

2019 年度 学位論文（修士）

RF カソード放出電子が ホローカソードシステムに与える影響評価

2020 年 1 月 24 日

首都大学東京大学院
システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
航空宇宙システム工学域 博士前期課程

18863610 野末 直暉

指導教員 竹ヶ原 春貴 教授

目次

<u>第 1 章 序論</u>	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	3
<u>第 2 章 ホールスラスタと電子源</u>	4
2.1 ホールスラスタ	4
2.1.1 ホールスラスタの作動原理	4
2.1.2 ホールスラスタの種類	6
2.1.3 ホールスラスタの電流収支	7
2.2 ホローカソード	8
2.2.1 ホローカソードの作動原理	8
2.2.2 電子放出材料	9
2.3 高周波プラズマカソード	10
2.3.1 高周波プラズマカソードの作動原理	10
2.3.2 インピーダンスマッチング	11
2.3.3 ホールスラスタとの組み合わせ作動	13
<u>第 3 章 実験装置</u>	14
3.1 真空環境模擬装置	14
3.2 ホローカソード	15
3.3 高周波プラズマカソード	16
3.4 ホールスラスタ	17
3.5 電力供給系	18
3.5.1 直流電力供給系	18
3.5.2 高周波電力供給系	18
3.6 作動ガス供給系	20
3.7 測定系	21
3.8 ローパスフィルター	22

第4章 実験構成	23
4.1 ホローカソードの点火時間	23
4.2 実験構成	27
4.3 実験条件	30
4.4 実験手順	31
 第5章 実験結果および考察	 33
5.1 ホローカソードと RF カソードの組み合わせ作動	33
5.1.1 実験結果	33
5.1.2 キーパー電流	34
5.1.3 容量結合プラズマ	37
5.2 キーパー電圧変更実験	38
5.2.1 実験結果	38
5.2.2 キーパー電流	39
5.3 高周波電力変更実験	41
5.3.1 実験結果	41
5.3.2 キーパー電流	41
5.3.3 投入電力およびエネルギー評価	43
5.4 点火手順変更実験	44
5.4.1 実験結果	44
5.5 ホールスラストとの組み合わせ作動	45
5.5.1 実験結果	45
 第6章 結論	 46
6.1 結論	46

参考文献

謝辞

第1章 序論

1.1 研究背景

宇宙機において姿勢制御や軌道間輸送を行うためには推進機が必要である。近年、人工衛星の需要が増加するとともに軌道間輸送や姿勢制御を行うことのできる推進機の需要も増加している。これまで人工衛星の主推進機として化学推進が用いられてきたが、今後においては化学推進に比べ比推力 I_{sp} が 10 倍以上もある電気推進の活躍が期待されている。図 1.1 に各推進機における比推力と推力密度の関係を示す。

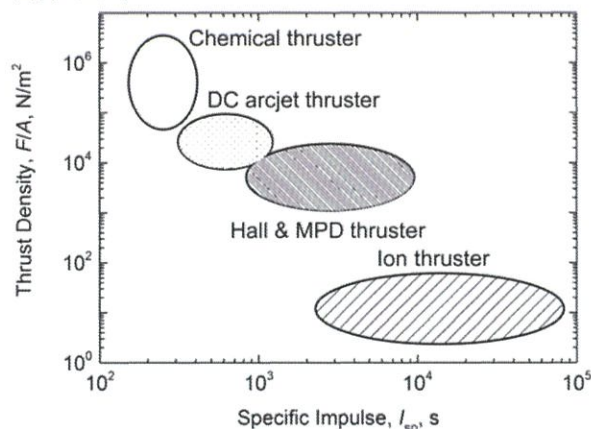


図 1.1 推進機における比推力と推力密度の関係¹⁾

これまで電気推進は、その比推力の高さ故に惑星探査などの長距離宇宙航行ミッションの主推進機として用いられていた。しかし、電気推進の性能向上や衛星バスの発電能力の向上により軌道間輸送や姿勢制御における推進機として電気推進を利用しようという動きが活発になっている。2015 年 3 月にはアメリカが、推進系を電気推進のみで構成したオール電化衛星と呼ばれる人工衛星 Eutelsat115 West B と ABS-3A を打ち上げた²⁾。日本においても技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) でオール電化衛星の技術実証をする計画である³⁾。Eutelsat115 West B と ABS-3A の推進機にはイオンエンジンが用いられている。図 1.1 よりイオンエンジンは、比推力は大きいが推力密度が他の電気推進と比較すると小さい。そのためイオンエンジンよりも推力密度が大きいホールスラスタの研究が進んでいる。今後、各国で計画されているオール電化衛星における推進機はホールスラスタがメインであり、ETS-9 も主推進機としてホールスラスタを搭載する予定である。よって、今後においてはホールスラスタのような大推力を実現できる電気推進の活躍が期待される。

ホールスラスタは円環状のチャンネルを有し、軸方向の電場と径方向の磁場が印加されている。外部に設置された電子源により放出された電子が電場と磁場によりトラップされ、放電室内に供給される推進剤と電離衝突を起こすことでプラズマが生成される。プラズマ中のイオンが電

場により加速され軸方向に噴出されることで、その反作用により推力を得ることができる。外部に設置された電子源は噴出されたイオンを中和する役割も担っており、電子源自身の性能も推進機として重要になる。電子源はイオンエンジンにも用いられており、放電室内にプラズマ生成用の電子源と外部に噴出されたイオンを中和するための電子源（中和器）の2つの電子源が設置されている。そのため、電子源は長年に渡って研究開発が進められており、現在多くの種類の電子源が存在する。大推力を実現するためには大電力の電気推進が必要になる⁴⁾。大電力の電気推進には必然的に大電流が必要になるため、電子源としても大電子電流を達成可能でなければならない。現在、10～100A 程度の大電子電流を容易に獲得できる電子源はホローカソード（Hollow Cathode: H/C）のみである。H/C は最も一般的であり長年に渡って研究されているが、現在でもさらなる大電流化を目指して開発が進められている⁵⁾。

一般的に H/C は、カソードチューブ内にある電子放出部（インサート）を加熱することにより熱電子を放出する。加熱は、カソードチューブに巻かれてあるヒーターに電力を投入することで行われる。放電可能温度に達したところで、中空のインサートにガスを流しキーパーに電圧を印加することで放電を開始し電子を引き出すことができる⁶⁾。H/C は、低電力、低ガス流量で大電子電流を獲得できるが、熱電子放出を利用しているためにヒーターによる制限が存在する。いくつかのヒーターによる制限を以下に示す。

1. 放電可能温度までの加熱に時間がかかり、結果的に作動に時間がかかってしまう。
2. 放電可能温度まで加熱可能なヒーターは限られ、入手が困難になる。
3. 加熱による高低温度サイクルによってヒーターが断線する。

これらの課題を解決するために H/C に代わる電子源の研究が盛んに進められている。本研究室においても H/C に代わる新たな電子源の研究が進められてきた。本研究室で開発された高周波プラズマカソード（Radio Frequency plasma Cathode: RF/C）は、放電室の外部もしくは内部に設置されたアンテナコイルに高周波電流が流れることで誘導電磁界が発生し、電子にエネルギーが与えられプラズマが生成される⁷⁾。RF/C は、熱電子放出ではなく高周波放電を利用しているためヒーターおよびインサートを必要とせずヒーターによる制限も存在しない。さらに電力と作動ガスの供給のみで即時点火をすることが可能であるが、H/C と比較すると電子電流は小さい。よって、RF/C では大電力の電気推進には対応することができず実機搭載が少ないのが現状である。H/C に代わる新たな電子源を開発することは困難を極めるため、現在でも大電子電流を容易に獲得できる H/C が注目されている。よって今後においては、大電子電流を獲得できる H/C において課題となるヒーターによる制限をなくしていくことが重要である。

1.2 研究目的

以上の研究背景より，本研究ではヒーターによる制限を緩和するために，H/C の点火までの過程において外部電子による支援を行うことを検討した．外部の電子源には本研究室で開発された RF/C を使用した．外部から電子を供給することによって H/C の点火を促進することを目標とし，RF/C が放出する電子によってホローカソードシステムにどのような影響を与えるかを H/C の点火時間と電力の観点から評価した．

第2章 ホールスラスタと電子源

2.1 ホールスラスタ

2.1.1 ホールスラスタの作動原理¹⁾

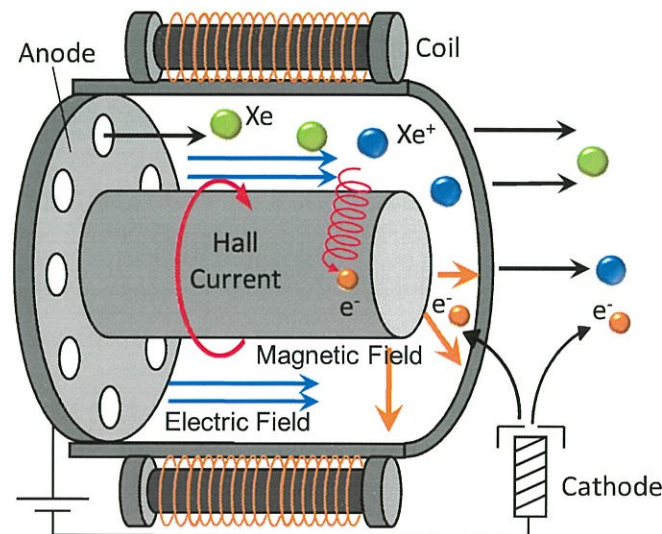


図 2.1 ホールスラスタの概念図

ホールスラスタは、図 2.1 に示すような中空円環状のプラズマ加速部（放電チャネル）に、軸方向の電場と半径方向の磁場を印加している。電場は放電チャネル上流のアノードと外部に設置されたカソードによって形成される。放電チャネル内の電位分布を最適化するために中空円筒形状のホローアノードが採用されることがある。磁場は外部に設置されたアウターコイルと放電チャネルの中心に設置されたインナーコイルに電流を流すことで半径方向に磁場を形成する。外部の電子源から放出された電子は軸方向の電場と半径方向の磁場により周方向に $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ドリフトし、ホール電流が誘起される。また電子には磁場とホール電流により下流方向にローレンツ力が働く。下流方向に働くローレンツ力と電場による上流方向に働く力の釣り合いで電子の軸方向の運動が制限され、放電チャネル内の静電場が維持される。しかし最終的に電子は、衝突などの拡散によりアノードに到達する。

電子は、放電チャネル内でアノード上流から供給された推進剤と電離衝突を起こしてプラズマを生成する。イオンは、電子に比べ質量が大きいためラーマ半径が大きい。よって、磁場の影響をほとんど受けず電場により下流方向に加速される。こうしてイオンが加速され下流に噴出された反作用でホールスラスタは推力を得ている。放電チャネル内は電気的に準中性が保たれているため空間電荷制限を受けない。そのためグリッド構造により空間電荷制限を受けてしまうイオンエンジンに比べて高い推力密度が得られるのが特徴である。

このような作動原理からホールスラストには以下の設計則がある.

$$\omega_e \tau_e \gg 1 \quad (2.1)$$

$$r_e \ll l \ll r_i \quad (2.2)$$

$$l \ll \lambda_i \quad (2.3)$$

ここで, ω_e は電子のサイクロトロン周波数, τ_e は電子の平均衝突時間, r_e , r_i はそれぞれ電子とイオンのラーマ半径, l は放電チャンネルの代表長さ, λ_i はイオンの平均自由行程を表す. 式(2.1)の左辺はホールパラメータと呼ばれ, 電子が1回衝突を起こすまでにどれだけ旋回運動をするかを表すパラメータである. 式(2.2)は, 電子は磁場により旋回運動するがイオンはほぼ旋回運動しないことを表している. 式(2.3)は, イオンが電子と再結合もしくは放電チャンネル壁に衝突しないことを表している. また, このような作動原理を持つホールスラストの作動時の問題として放電電流の振動現象がある. この現象は, 推進効率の低下, 作動不安定性の要因の一つであるとされている. 現在, 振動現象は振動数帯域的に5種類に分類される説が有力である.

1. Ionization Oscillation	10^4 - 10^5 Hz
2. Transit-time Oscillation	10^5 - 10^6 Hz
3. Electron-drift Oscillation	10^6 - 10^7 Hz
4. Electron-cyclotron Oscillation	10^9 Hz
5. Langmuir Oscillation	10^8 - 10^{10} Hz

1.~3.はホールスラスト特有の振動であると考えられている. 4.5.はプラズマ固有の振動であり回避不可能である. ホールスラストの振動の中で振幅が最大であり作動安定性に影響を与えるのが1.の Ionization Oscillation (電離振動)である. この振動のメカニズムは Lotka-Volterra の捕食者-被食者モデルを例に説明することができ, 図 2.2 に電離振動のメカニズムを示す.

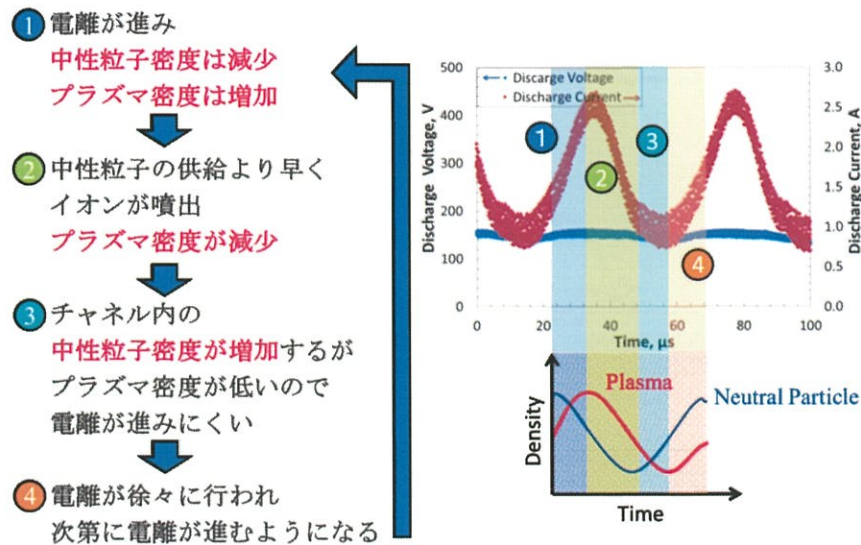


図 2.2 電離振動のメカニズム ⁸⁾

2.1.2 ホールスラスタの種類¹⁾⁶⁾

ホールスラスタには、エンドホール型、シリンдриカル型、マグネティックレイヤ型（Stationary Plasma Thruster: SPT）、アノードレイヤー型（Thruster with Anode Layer: TAL）などがある。ここでは、ロシアで開発され一般的に広く使用されている SPT 型と TAL 型について説明する。図 2.3 および図 2.4 にそれぞれ SPT と TAL の概念図を示す。

SPT は、1960 年代にロシアの A. I. Morozov によって開発された。放電チャンネル内でイオン生成が十分に行われるように、チャンネル長をチャンネル幅に対して長くなるように設計してある。放電チャンネル壁は、窒化ホウ素（BN）や BN-SiO₂ などの絶縁体でできている。イオンや高エネルギーの電子が放電チャンネル壁に衝突することで低エネルギーの 2 次電子が放出されるため、放電チャンネル内の電子温度は低く抑えられる。しかし、放電チャンネル壁にイオンや高エネルギーの電子が衝突することによって耐久性に問題がある。

TAL は、A. V. Zharinov によって提唱されロシアの研究所において開発された。放電チャンネル壁への損失を少なくするためにチャンネル長をチャンネル幅に対して短く設計している。放電チャンネル壁（ガードリング）が耐スパッタ性の高い金属でできており、SPT に比べると耐久性に優れている。ガードリングはカソード電位であるため電子の放電チャンネル壁への衝突が少なく、電子のエネルギー損失が少ないため放電チャンネル内の電子温度は高いままであり、高効率が望める。アノードとガードリングの電位差はアノード近傍の薄い層（アノードレイヤー）に集中し、イオンの加速はほとんどこの範囲で行われていると考えられている⁹⁾。

以上より、TAL は SPT に比べ耐久性・推力密度が高く、高効率が望める。しかし、TAL は SPT に比べ安定作動領域が狭く、放電電流振動が起りやすいという欠点があるため宇宙での推進機としての利用実績が少ないのが現状である。TAL の放電電流振動を抑制し、安定作動領域を広げることが課題である。

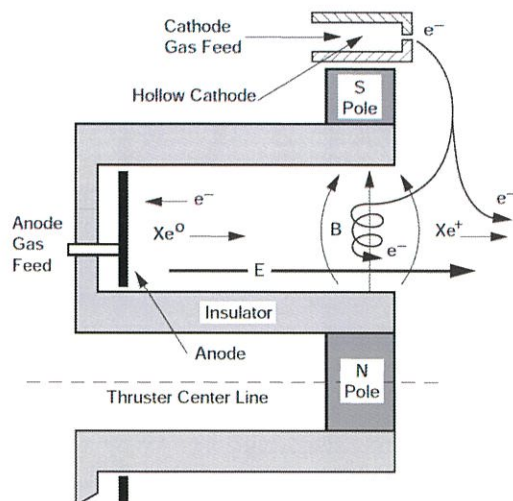


図 2.3 SPT の概念図⁶⁾

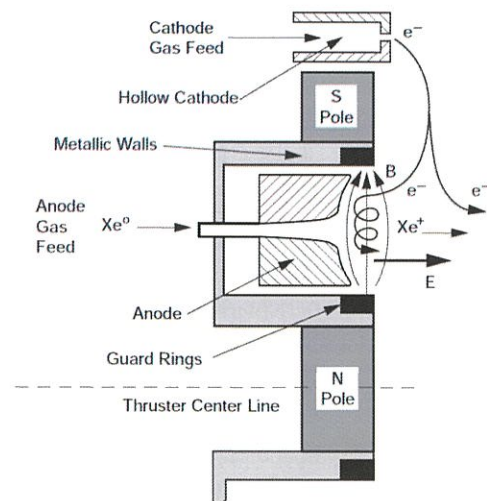


図 2.4 TAL の概念図⁶⁾

2.1.3 ホールスラスタの電流収支¹⁰⁾

図 2.5 に宇宙空間におけるホールスラスタ作動時の電流収支モデルを示す．図中の電子電流は実際の電流方向ではなく，荷電粒子が流入する方向である．

アノードに流れる放電電流 I_d は電子源から放出された電子 I_{back} とプラズマ生成で生じた 2 次電子 I_{ie} であり，式 (2.4) のように表せる．

$$I_d = I_{back} + I_{ie} \quad (2.4)$$

また，放電電流 I_d は電子源から放出される電子電流と等しいため，式 (2.5) のように表せる．

$$I_d = I_{back} + I_n \quad (2.5)$$

電離によって生成されたイオンが全て 1 価イオンだと仮定すると，電離によって生成されたイオン電流 I_b と電子電流 I_{ie} は式 (2.6) のように表せる．

$$I_b = I_{ie} \quad (2.6)$$

よって，式 (2.4)，式 (2.5)，式 (2.6) より式 (2.7) が導かれる．

$$I_b = I_n \quad (2.7)$$

以上より，放電電流と電子源から放出される電子電流が等しいとき，ホールスラスタからの噴出イオンが電子源によって完全中和されることが示された．

図 2.6 に完全中和状態での電荷収支の粒子モデルを示す．図では宇宙空間を模擬した真空槽内での作動を想定している．完全中和状態のときプラズマ生成領域では，



中和領域では，



という関係が成り立ち，中和後には中性粒子である Xe のみが残る．よって，多量のイオンを噴出する大推力スラスタには大電子電流の電子源が必要である．

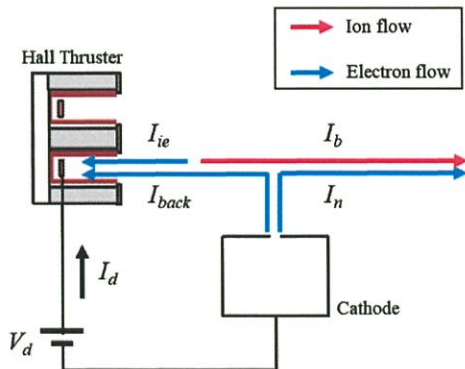


図 2.5 ホールスラスタ作動時の電流収支

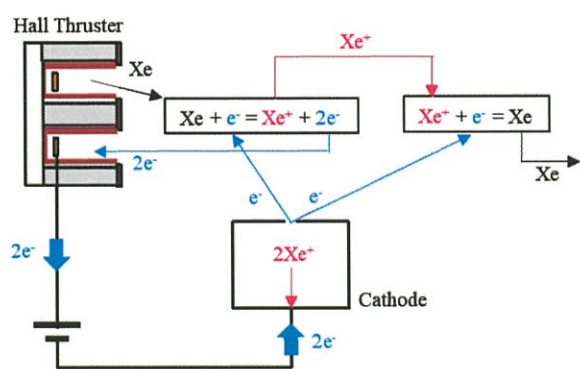


図 2.6 完全中和状態での電荷収支の粒子モデル

2.2 ホローカソード

2.2.1 ホローカソードの作動原理⁶⁾

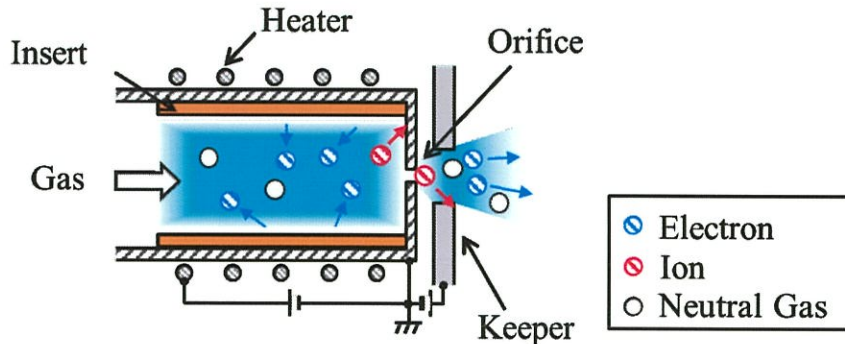


図 2.7 ホローカソードの概念図

ホローカソード (Hollow Cathode: H/C) は、図 2.7 に示すような中空円筒構造になっている。一般的に H/C は、カソードチューブ内にある電子放出部（インサート）を加熱することによって熱電子を放出する。熱電子は放電室と外側のキーパー電極の間の電場によってエネルギーを得て、作動ガスを衝突電離させる。加熱は、カソードチューブに巻かれてあるヒーターに電力を投入することによって行われる。ヒーターによってインサートが加熱され、放電可能温度まで達したところで、中空のインサート内に作動ガスを流しキーパーに電圧を印加することで放電を開始する。一度点火すると外部のアノードとの間で放電が行われ、放電によってインサートが自己加熱するので点火後はヒーターによって加熱をする必要はなくなる。よって、ヒーターは H/C の点火までに使用するのが一般的であり、点火後はヒーターをオフにする。

以上のように H/C は熱電子放出を利用しているため、低電力・低ガス流量で大電子電流を得られる。しかし、熱電子放出を利用しているが故に以下に示すような欠点が存在する。

1. 放電可能温度までの加熱に時間がかかり、結果的に作動に時間がかかってしまう。
2. 放電可能温度まで加熱可能なヒーターは限られ、入手が困難になる。
3. 加熱による高低温度サイクルによってヒーターが断線する。
4. インサートに使用する電子放出材料は反応性が高く、厳密な管理が必要である。

1.~3.はヒーターを使用して加熱を行っているが故の課題である。4.は電子放出材料における課題である。電子放出材料は現在でも開発が行われ、酸素雰囲気中で耐性のある材料などが開発されているが、1.~3.におけるヒーターによる制限をなくしていかなければ H/C の作動環境や寿命に大きく影響してくる。

2.2.2 電子放出材料

熱電子放出を利用する H/C ではインサートの材料に仕事関数の小さい物質を用いる。また、熱電子放出は以下の式 (2.10) に示すリチャードソン・ダッシュマン (Richardson-Dushman) の式によって表される。

$$j_c = A_c T_c^2 \exp\left(-\frac{\Phi}{k_B T_c}\right) \quad (2.10)$$

ここで、 j_c は熱電子電流密度、 A_c は熱電子放出係数、 T_c は表面温度、 Φ は仕事関数、 k_B はボルツマン定数である。式 (2.10) より、仕事関数の小さい物質を用いれば低温で大電子電流を得られることがわかる。代表的な熱電子放出材料の特性を図 2.8 に示す。

現在、仕事関数の小さい材料として用いられているのが酸化バリウム (BaO) をタングステンに含浸させた BaO-W411 である。仕事関数が小さいため比較的低温で大電子電流を獲得するのが特徴である。しかし、BaO-W411 は酸素雰囲気中での劣化が著しく厳密な管理を必要とする。それに対して、近年新たな熱電子放出材料として注目されているのが六ホウ化ランタン (LaB_6) である。 LaB_6 は BaO-W411 と比較すると、仕事関数は大きい酸素雰囲気中での劣化に耐性がある。 LaB_6 は取り扱いが容易になる点だけでなく、高温まで加熱すればその分だけ大電子電流密度を得られるため大推力のスラスタの作動に対して有効である。しかし LaB_6 を使用した H/C を用いた場合、 LaB_6 を 2000 K 程度の高温まで加熱する必要があるため、それを実現可能なヒーターは限られてくる。2.2.1 で示した 1.~4. の H/C の欠点において、4. については LaB_6 を使用することで厳密な管理の必要がなくなる。しかし、1.~3. におけるヒーターによる制限はヒーターの加熱がより高温になることでさらに厳しくなってしまう。そのため、 LaB_6 による利点を生かすためにもヒーターによる制限をなくしていくことが今後の H/C において重要な課題である。

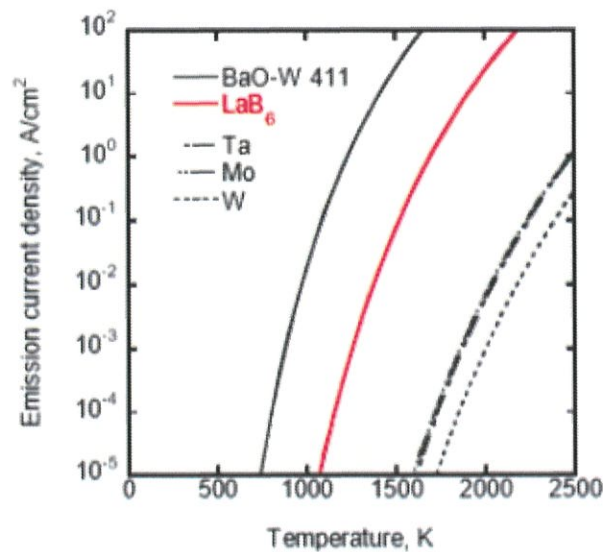


図 2.8 電子放出材料の温度に対する電子電流密度 ⁵⁾

2.3 高周波プラズマカソード

2.3.1 高周波プラズマカソードの作動原理

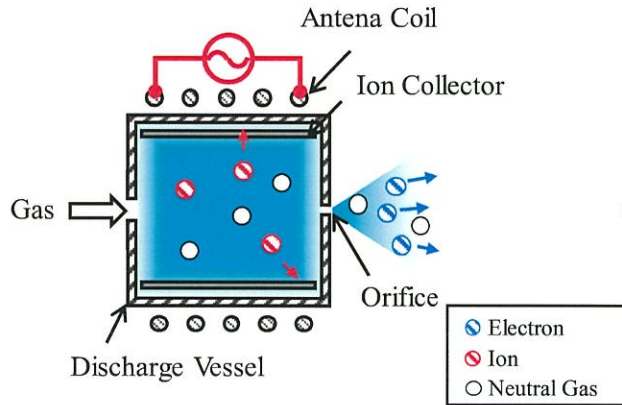


図 2.9 Outer Coil 型 RF/C の概念図

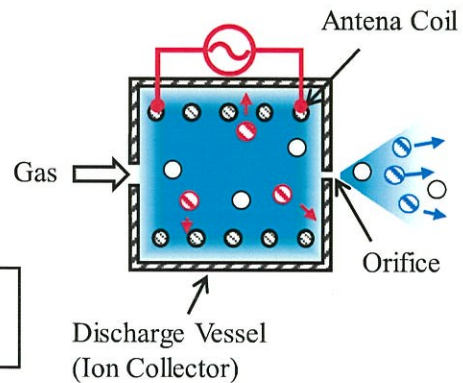


図 2.10 Inner Coil 型 RF/C の概念図

高周波プラズマカソード (Radio Frequency plasma Cathode: RF/C) は、アンテナコイルが放電室の外部にあるものを Outer Coil 型、放電室の内部にあるものを Inner Coil 型と呼ぶ。アンテナコイルに高周波電流が流れることで誘導電磁界が発生し、電子にエネルギーが与えられプラズマが生成される。RF/C は、熱電子放出ではなく高周波放電を利用しているためヒーターおよびインサートが必要とせずヒーターによる制限も存在しない。さらに電力と作動ガスの供給のみで即時点火をすることが可能であるが、H/C と比較すると電子電流は小さい。Outer Coil 型は、放電室が絶縁体でできているため放出した電子と等価のイオンを捕集するための電極（イオンコレクタ）が放電室の内部に存在する。アンテナコイルは電気抵抗の小さい銅を用いる場合が多い。Inner Coil 型は、放電室が金属であるため放電室そのものがイオンコレクタの役割を担っている。アンテナコイルは内部にあるためスパッタリングの影響を考慮し、タングステンなどのスパッタリングに耐性のあるものを使用する。

高周波プラズマは、容量結合プラズマ (Capacitively Coupled Plasma : CCP) と誘導結合プラズマ (Inductively Coupled Plasma : ICP) の 2 種類がある。容量結合プラズマは、高周波電極と接地電極間の変動電場により初期電子にエネルギーが与えられプラズマが生成・維持される。誘導結合プラズマは、アンテナコイルに高周波電流を流すことにより磁場変動が起こり初期電子にエネルギーが与えられ電離を起こしプラズマが生成される。また、磁場により電場が誘導され電子が加速することでプラズマを維持する。本研究で用いる RF/C は誘導結合プラズマが主に生成するように設計されている。また、Inner Coil RF/C は放電室が金属のため、放電室-コイル間で容量結合プラズマも生成されている。

2.3.2 インピーダンスマッチング⁸⁾¹¹⁾

高周波を負荷に投入する際、電源のインピーダンスと負荷のインピーダンスが一致していないと反射波が発生し電力が効率的に負荷へ投入されない。よって RF/C を使用する場合、電源と負荷のインピーダンスを一致させるための整合器が必要である。電源と負荷のインピーダンスを一致させることをインピーダンスマッチングという。ここで、図 2.11 のように高周波電源から出力される電圧を V_0 、電流を I_{RF} 、高周波電源のインピーダンスを Z_0 、負荷のインピーダンスを Z_L とすると、負荷に供給される電力 W_L は式 (2.11) となる。

$$\begin{aligned}
 W_L &= I_{RF}^2 \times Z_L \\
 &= \left(\frac{V_0}{Z_0 + Z_L} \right)^2 Z_L \\
 &= V_0^2 Z_L / (Z_0^2 + 2Z_0 Z_L + Z_L^2) \\
 &= V_0^2 / \{ Z_L + 2Z_0 + (Z_0^2 / Z_L) \} \quad (2.11)
 \end{aligned}$$

電力 W_L が最大になるためには式 (2.11) の分母が最小となる必要がある。負荷のインピーダンス Z_L を変数として $f(Z_L) = Z_L + 2Z_0 + (Z_0^2 / Z_L)$ とおき $f(Z_L)$ を Z_L について微分すると式 (2.12) となる。

$$f'(Z_L) = 1 - Z_0^2 / Z_L^2 \quad (2.12)$$

式 (2.12) より $f(Z_L)$ が最小 (W_L が最大) となるのは $Z_L = Z_0$ のときである。

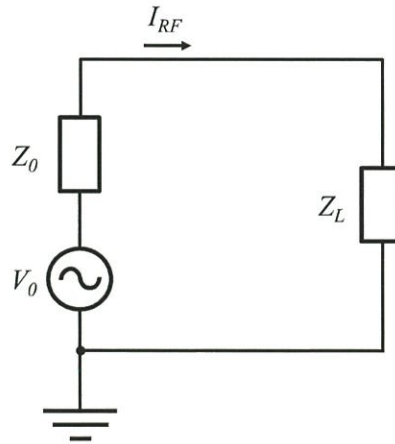


図 2.11 高周波回路モデル

本研究で使用した整合回路は図 2.12 に示すように直列と並列に 1 個ずつ可変コンデンサから構成されたものを使用した。高周波電源におけるインピーダンスは 50Ω に設定されているので $Z_0 = 50 \Omega$ 、負荷の抵抗を R_L 、負荷のリアクタンスを X_L 、角周波数を ω とする。

負荷のインピーダンスとマッチング回路の直列コンデンサ C_S を合わせたインピーダンス Z_S は式 (2.13) のように表せる。

$$\begin{aligned}
Z_S &= Z_L - j \frac{1}{\omega C_S} \\
&= (R_L + jX_L) - j \frac{1}{\omega C_S} \\
&= R_L + j \left(X_L - \frac{1}{\omega C_S} \right)
\end{aligned} \tag{2.13}$$

次に Z_S とマッチング回路の並列コンデンサ C_p を合わせたインピーダンス Z_{S+p} は式 (2.14) のように表せる.

$$\begin{aligned}
Z_{S+p} &= \frac{1}{\frac{1}{Z_S} + j\omega C_p} \\
&= \frac{1}{\frac{1}{R_L + j \left(X_L - \frac{1}{\omega C_S} \right)} + j\omega C_p} \\
&= \frac{1}{\frac{R_L}{R_L^2 + \left(X_L - \frac{1}{\omega C_S} \right)^2} + j \left\{ \frac{-X_L + \frac{1}{\omega C_S}}{R_L^2 + \left(X_L - \frac{1}{\omega C_S} \right)^2} + \omega C_p \right\}}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

以上より, インピーダンスマッチングの条件は式 (2.15) および (2.16) のように表せる.

$$\frac{R_L}{R_L^2 + \left(X_L - \frac{1}{\omega C_S} \right)^2} = \frac{1}{50} \tag{2.15}$$

$$\frac{-X_L + \frac{1}{\omega C_S}}{R_L^2 + \left(X_L - \frac{1}{\omega C_S} \right)^2} + \omega C_p = 0 \tag{2.16}$$

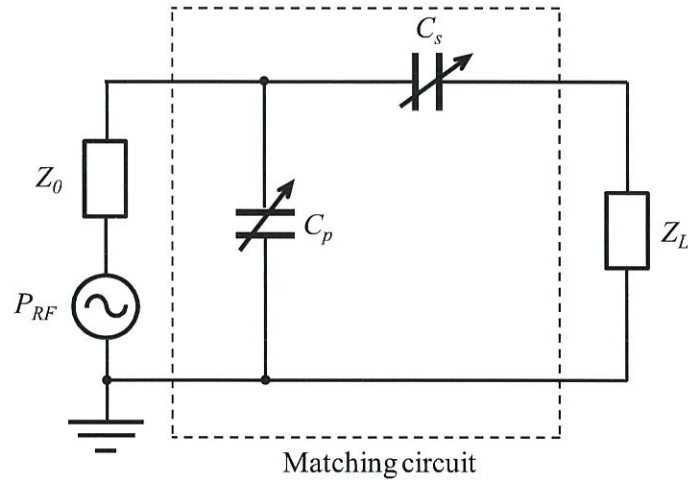


図 2.12 マッチング回路

2.3.3 ホールスラスタとの組み合わせ作動⁸⁾

2.3.1 で述べたように高周波プラズマには容量結合プラズマと誘導結合プラズマの2種類が存在する。本研究で用いる Inner Coil RF/C は、過去にホールスラスタとの組み合わせ作動を行った際に RF/C とホールスラスタとの間で容量結合プラズマが生成されたのが確認されている。

図 2.13 は、H/C および RF/C をホールスラスタと組み合わせた際の様子である。図 2.13 において左側の図は H/C とホールスラスタを組み合わせた際の様子である。H/C 点火後、スラスタに作動ガスのみを投入し磁場および放電電圧は印加していない状態である。放電電圧を印加していないのでアノード-カソード間で放電は起きておらず発光は見られない。図 2.13 において右側の図は Inner Coil RF/C をホールスラスタと組み合わせた際の様子である。RF/C を点火後、磁場および放電電圧を印加せず作動ガスのみ投入すると、放電チャンネル内でプラズマが生成される Inner Coil RF/C 特有の現象 (Doughnut-like ring light) が発生する。

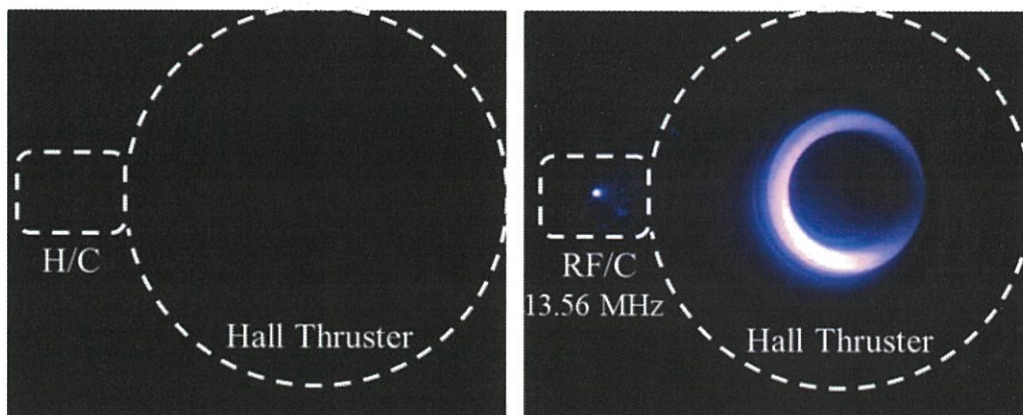


図 2.13 H/C (左図) および RF/C (右図) をホールスラスタと組み合わせた際の様子

Doughnut-like ring light のプラズマは、RF/C のアンテナコイルと放電チャンネル間で生じた容量結合プラズマだと考えられている。RF/C と放電チャンネル間の容量結合によるプラズマ生成機構が存在することで、放電チャンネル内でのプラズマ生成・維持が容易になり作動範囲の拡大、放電電流振動が緩和されたという結果が報告されている。また、図 2.13 における RF/C の高周波電流の周波数は 13.56 MHz であるが、27.12 MHz でも同じ現象が起きることが確認されている。

本研究においては、この容量結合プラズマを用いることで H/C の点火を促進できるのではないかと考えた。外部の電子源によって H/C の点火に対して電子による支援を行うのと同時に、Inner Coil RF/C と H/C の間で容量結合プラズマを生成することができれば H/C 内部のプラズマが生成しやすくなり結果的に点火をしやすくなると考える。よって、本研究においては外部の電子源として Inner Coil RF/C を採用した。

第3章 実験装置

3.1 真空環境模擬装置

本研究では宇宙環境を模擬するために真空環境模擬装置（真空槽）を使用した。図 3.1 は真空槽全体の概略図である。真空槽は、長さ 3.2 m、直径 1.6 m で SUS304 製の円筒型である。低真空排気にロータリーポンプ（RP）とメカニカルブースターポンプ（MBP）、高真空排気にはクライオポンプ（CP）を 2 台使用した。これにより汚染が少なく、かつ高真空環境を作り出すことが可能である。表 3.1 に各ポンプの性能を示す。真空槽内圧力は低真空環境ではコンベクトロンゲージ、高真空環境では電離真空計で測定している。使用した圧力計は窒素で校正されているため作動ガスに対する真値となるように補正を行っている。

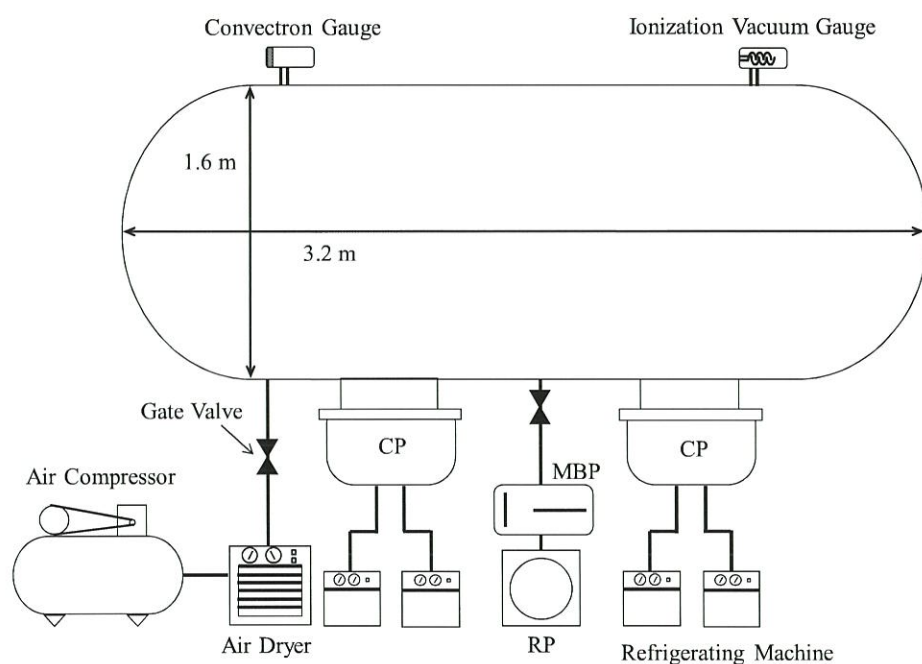


図 3.1 真空槽全体の概略図

表 3.1 ポンプの排気性能

		Pumping speed	Ultimate pressure	Power consumption
		L/s	Pa (Torr)	kW
Mechanical booster pump	MBP with RP-A	78	$2.0 \times 10^{-2} (1.5 \times 10^{-4})$	4.0
Cryogenic Pump	CP	28000	$1.0 \times 10^{-6} (7.5 \times 10^{-9})$	5.9

3.2 ホローカソード

本研究で使用した H/C は、Veeco 社製の HCN-252 である。図 3.2 に H/C の外観を示す。HCN-252 は、カソードチューブにヒーター線が巻かれてあり内部にインサートがあるカソードチップとキーパー電極で構成されている。電子放出材料は BaO-W411 であり、ヒーターはシース構造になっておりタンタル線を絶縁物で覆っている。作動ガスはキセノンを使用した。

図 3.3 は電子源単体の性能評価をする際によく行われるダイオードコンフィグレーションである。電子源の下流 50 mm の位置にイオンビーム模擬のために金属の平板を設置し、金属平板に正電圧を印加することで電子源から電子を引き出す。金属平板に流れ込む電子電流を測定することで電子源の電子放出性能を評価する実験である。図 3.3 のダイオードコンフィグレーションで行われた実験で得られた本研究で使用する H/C の電子放出性能を図 3.4 に示す。

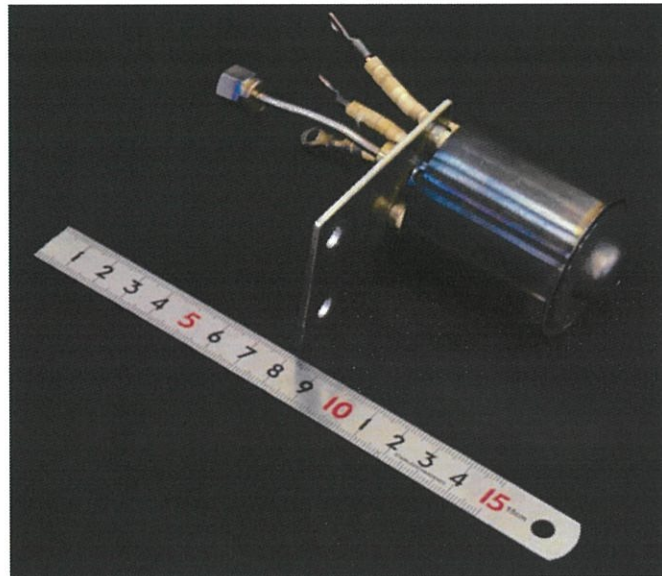


図 3.2 H/C 外観

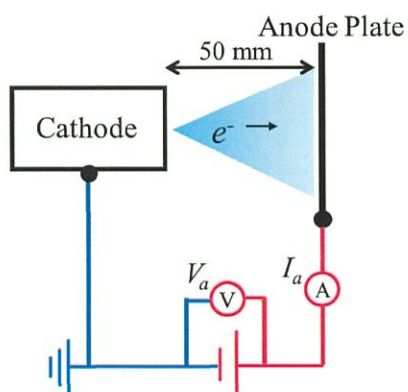


図 3.3 ダイオードコンフィグレーション

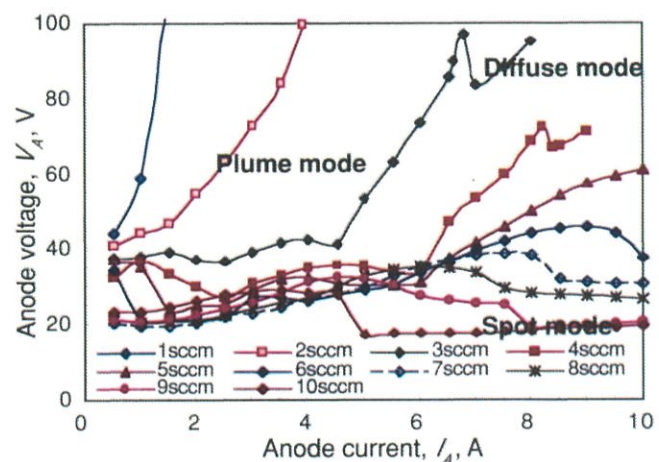


図 3.4 H/C の電子放出性能¹²⁾

3.3 高周波プラズマカソード

本研究で使用した RF/C は放電室の内部にアンテナコイルがある Inner Coil RF/C である．図 3.5 に RF/C の外観，図 3.6 に RF/C の断面図を示す．耐熱・耐スパッタ性を考慮し，放電室はモリブデン，オリフィスとアンテナコイルはタングステンである．放電室内で生成された電子はオリフィスを通して放出される．作動ガスはキセノンを使用した．

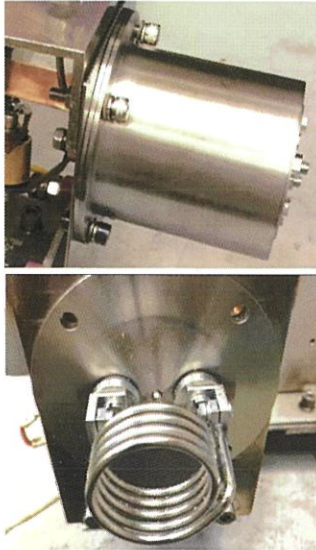


図 3.5 RF/C 外観

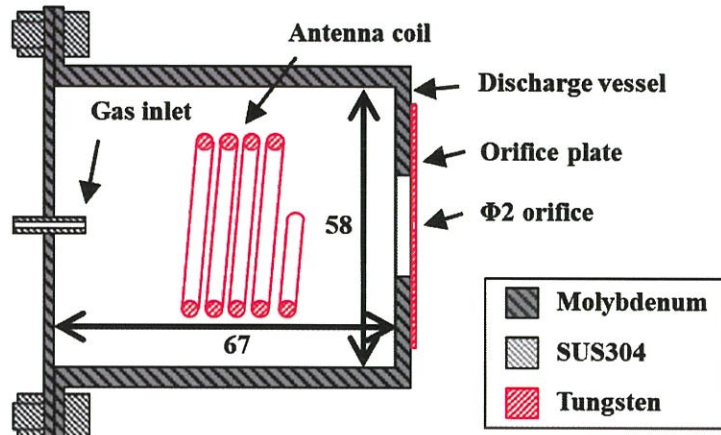


図 3.6 RF/C 断面図

図 3.7 に RF/C の電子放出性能を示す．電子放出性能は H/C と同様に図 3.3 のダイオードコンフィグレーションにて実験を行った結果である．流量は 2 sccm，作動周波数は 13.56 MHz および 27.12 MHz，電力は 300 W である．図 3.10 より 13.56 MHz に比べ 27.12 MHz の方が電子放出性能は高いといえる．しかし，本研究においては RF/C から H/C へ供給する電子の量は，電子電流で 1 A 未満であるので作動周波数 13.56 MHz における電子放出量で十分である．

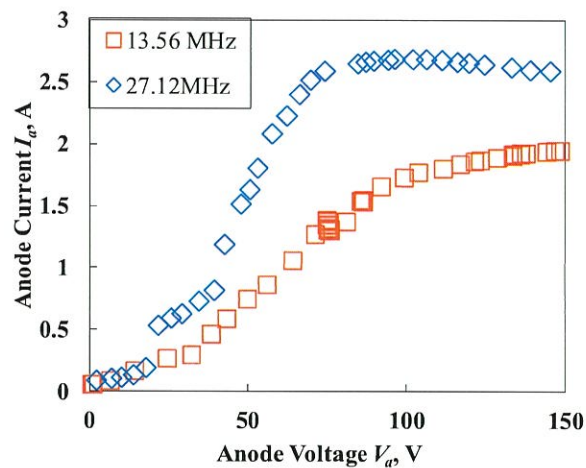


図 3.7 RF/C の電子放出性能⁸⁾

3.4 ホールスラスタ

本研究で使用したホールスラスタの外観を図 3.8 に示す。本研究において RF/C が放出した電子を利用して点火させた H/C がスラスタと組み合わせた際に問題がないかを確認するために、ホールスラスタとの組み合わせ作動を行った。

ホールスラスタは過去に首都大学東京で開発された TAL 型ホールスラスタ (TMU-066) を使用した。図 3.9 に示すように金属製の放電室およびガードリングを保有し、アノードはホローアノード形状である。磁場を形成するためのソレノイドコイルは中心にインナーコイルが 1 本と外周にアウターコイルが 6 本付いている。インナーコイルとアウターコイルは独立して電流を流すことが可能であり、電流を変化させることで磁束密度、磁場形状を変化させることが可能である。推進剤は、スラスタ後部から投入しアノード上流部の空間に一時的に貯留される。貯留部の下流側壁面に周方向に均一に設けられた 24 個の孔から放電室へ供給される。推進剤はキセノンを使用した。

本研究では H/C と RF/C を組み合わせて作動し、RF/C が放出した電子において H/C の点火を支援することが目的であるため、H/C が点火した後は RF/C は作動停止させる。よって、本研究では H/C 点火後に RF/C を停止させ、RF/C が放出した電子を利用して点火させた H/C でホールスラスタを作動させることができるかを検証した。ホールスラスタを作動することが可能であれば、本研究における H/C と RF/C を組み合わせたシステムでスラスタと組み合わせて作動させることが可能となる。

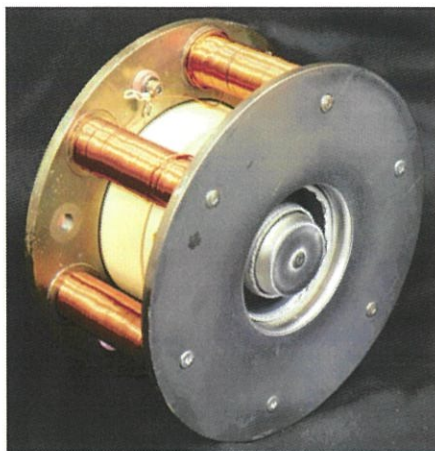


図 3.8 ホールスラスタ外観

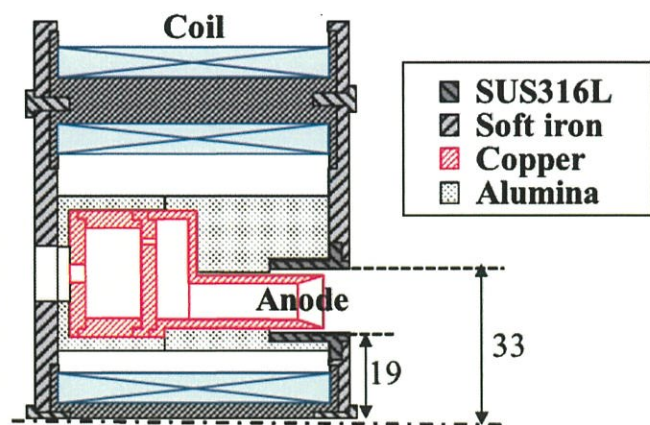


図 3.9 ホールスラスタ断面図

3.5 電力供給系

3.5.1 直流電力供給系

図 3.10 および図 3.11 はそれぞれ本研究で使用したヒーター電源およびキーパー電源の外観である。また、表 3.2 に各電源の概要を示す。H/C のヒーターおよびキーパーへの電力供給として直流安定化電源を使用した。ヒーター電源は定電流 (Constant Current: CC) で動かし、キーパー電源は H/C 点火前は定電圧 (Constant Voltage: CV) で動かし H/C 点火後は定電流に切り替わるようにセットした。



図 3.10 ヒーター電源外観



図 3.11 キーパー電源外観

表 3.2 直流安定化電源概要

		Company	Model	Output
H/C	Heater Power Supply	NISTAC	NH-120	0-120V/0-10A
	Keeper Power Supply	NISTAC	NT-20	0-550V/0-1A

3.5.2 高周波電力供給系

本研究において RF/C に使用した高周波電源の外観を図 3.12 に示す。また、表 3.3 は高周波電源の概要である。作動周波数は国際電気通信連合 (ITU) によって制限されており、使用できるのは ISM (Industry Science Medical) バンド内である。このバンドには 13.56, 27.12, 40.68 MHz 等が含まれている。これらの周波数は半導体プロセスにも使用されているため、高周波を発生させる電源や整合器が安価で入手が可能である。よって、本研究では表 3.3 に示す 13.56 MHz の高周波電源を使用した。

インピーダンスマッチングに用いる整合回路 (Matching Box: MB) の構造を図 3.13 に示す。また、マッチングボックスの概要を表 3.4 に示す。マッチングボックスは電子源に対して直列および並列に 1 個ずつ、計 2 個の可変キャパシタで構成されている。MB は真空槽内に設置し、真空槽外部から図 3.14 に示すコントローラーによりキャパシタの容量を変化させることでインピーダンスマッチングを行った。



図 3.12 高周波電源外観



図 3.13 マッチングボックスの構造



図 3.14 コントローラー外観

表 3.3 高周波電源概要

Company	Model	Frequency	Output
Ion Tech	RF-5S	13.56 MHz	0-500W

表 3.4 マッチングボックス概要

Company	Model	Series Capacitance(C_s)	Parallel Capacitance(C_p)
Tham way	T020-5766K	150-1500pF (MEIDEN, SCV-415H65UW)	200-200pF (MEIDEN, SCV-320H70UW)

3.6 作動ガス供給系

H/C および RF/C の作動ガスにはキセノンガスを使用した。充填タンクからレギュレータを通し減圧したのち，図 3.15 に示す流量調整器（Mass Flow Controller: MFC）を介して所望の流量を供給した。MFC の概要を表 3.5 に示す。流量の単位の sccm は，Standard Cubic Centimeter per Minutes の略であり，標準状態（0℃，1 atm）において 1 分間に何 cc 流れるかを表している。キセノンガスの場合，原子量が 131.29 mg/mol であるので式（3.1）のように単位換算することができる。

$$\frac{\dot{m}[\text{sccm}]}{22.4 \times 10^3 \times 60} \times 131.29 = \dot{m} [\text{mg/s}]$$

$$\Leftrightarrow 1 \text{ sccm} = 0.0977 \text{ mg/s} \quad (3.1)$$



図 3.15 MFC 外観

表 3.5 MFC 概要

	Company	Model	Calibration Gas	Range	Accuracy
MFC for H/C	Aera Japan	FC-260J	Xenon	~50.0 sccm	<±0.2% F.S.
MFC for RF/C	Aera Japan	FC-260J	Xenon	~10.0 sccm	<±0.2% F.S.

F.S. = full scale

3.7 測定系

H/C および RF/C の電流・電圧は図 3.16 に示す Sanwa 製デジタルマルチメータ PC773 を使用して測定した。また、PClick7 を用いてデータの記録を行った。表 3.6 にデジタルマルチメータの概要を示す。データのサンプリングタイムは 1 s である。また、RF/C からの電子電流に 13.56 MHz の周波数がのっていることを確認するために、図 3.17 に示す Tektronix 製オシロスコープ TDS2014B、電流プローブ TCP A300 を測定の一部に使用した。表 3.7 にオシロスコープの概要を示す。オシロスコープのサンプリングタイムは 0.4 ns である。



図 3.16 DMM 外観



図 3.17 オシロスコープと電流プローブ外観

表 3.6 デジタルマルチメータ概要

	Company	Model	Range	Accuracy	Sampling time
Digital Multimeter	Sanwa	PC773	~1000V ~11A	<±0.38% F.S. <±0.5% F.S.	-
Date Logger	Sanwa	PClick7	-	-	1 s

F.S. = full scale

表 3.7 オシロスコープ概要

	Company	Model	Current Probe	Sampling time
Digital Oscilloscope	Tektronix	TDS2014B	TCP A300	0.4 ns

3.8 ローパスフィルター

RF/C から放出される電子による高周波ノイズが直流安定化電源に侵入すると、電源が正常に作動しなくなり任意の電力を投入できず故障するおそれがある。よって、高周波ノイズが直流安定化電源に侵入するのを防ぐために、ヒーター電源-ヒーター間およびキーパー電源-キーパー電極間にローパスフィルター (Low Pass Filter: LPF) を挿入した。図 3.18 および図 3.19 にそれぞれヒーター用 LPF, キーパー用 LPF の回路図を示す。

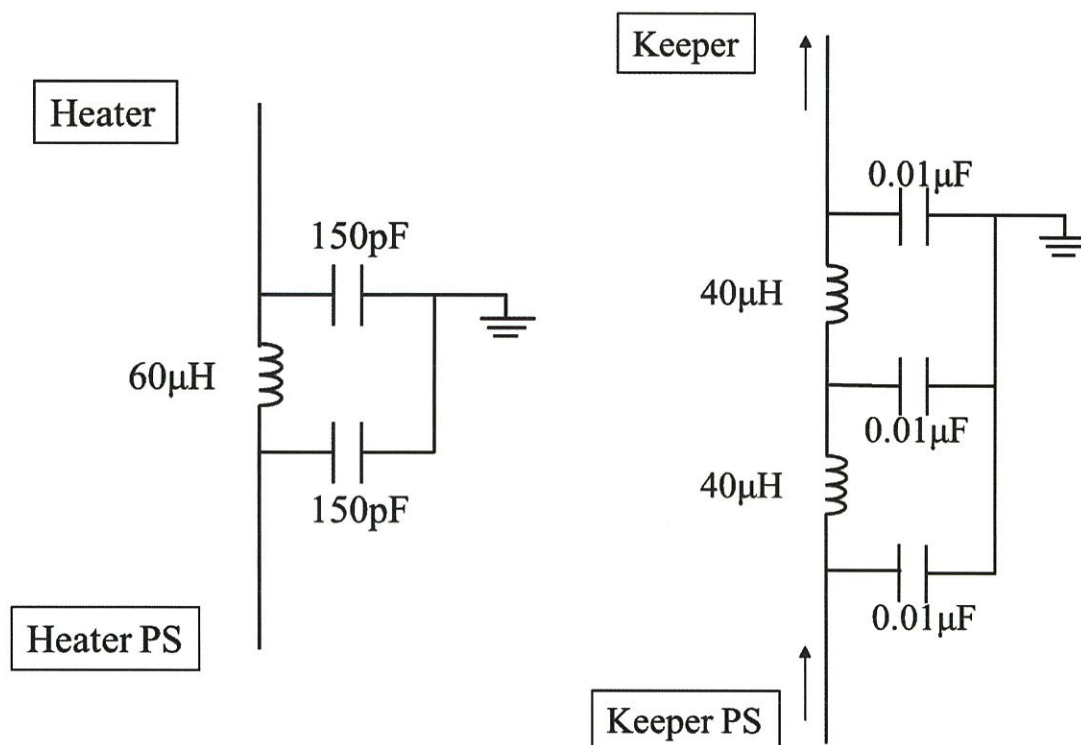


図 3.18 ヒーター用 LPF

図 3.19 キーパー用 LPF

第4章 実験構成

4.1 ホローカソードの点火時間

本研究において測定する項目の一つであるホローカソードの点火時間について記述する。図4.1は、あるH/Cの点火までのヒーター電流およびヒーター電圧の時間履歴である。H/Cのヒーターは一般的に定電流で電力を投入する。図4.1では1Aずつ階段状に電流を投入しているのがわかる。それに従い、ヒーターの温度が上昇するとともにヒーターの抵抗値が上昇する。図4.1では定電流に対してヒーター電圧が上昇している様子として温度が上昇しているのがわかる。ある程度まで温度が上昇するとヒーター電圧も飽和してくるのでさらに電流を投入して加熱をしていく。そして、放電可能温度まで上昇したところで作動ガスを投入しキーパー電極に電圧を印加することで放電を開始する。

このように電流を徐々に増加させる理由は、急激な加熱によって発生する熱応力の負荷を防ぐためである。しかし、ヒーター電流の投入の仕方は定まっておらずヒーターの加熱にかかる時間は同じH/Cであっても統一されていない。長い時間をかけてゆっくり加熱すればH/Cにかかる負荷は防ぐことができるが点火までの時間が長くなってしまう。よって、H/Cにかかる負荷と点火までの時間を考慮してヒーター電力の投入間隔を決定しなければならない。

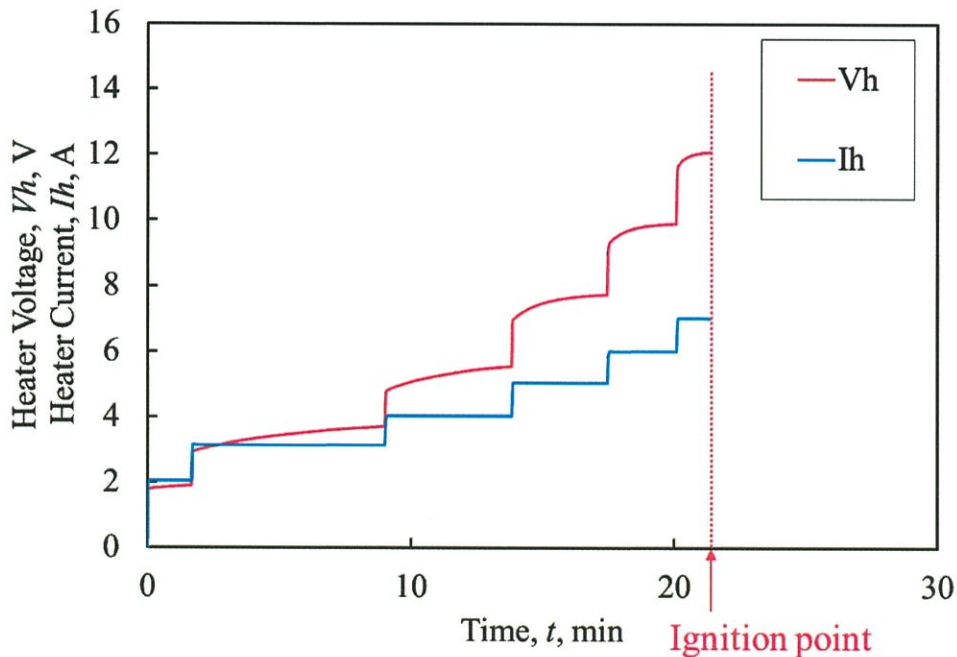


図4.1 H/Cの点火までの時間履歴

本研究において、H/C の点火時間を測定し比較を行うためにヒーター電力の投入間隔を統一化する必要がある。図 4.1 において、ヒーター電圧が飽和したところでヒーター電流を増加させている。このヒーター電圧の飽和は温度上昇の飽和を意味し、熱平衡に達していることを表している。よって、熱平衡点を基準点として設けることで熱平衡点に達したらヒーター電流を増加するという手順をとることとする。図 4.2 は、図 4.1 においてヒーター電圧の傾きをプロットしたものである。ヒーター電圧の傾きは $\Delta V_h / \Delta t$ として算出した。ヒーター電圧の傾きは定電流に対して時間の経過とともに減少していく。このヒーター電圧の傾きに一定の基準を設け、その点を熱平衡点と定めることでヒーター電流を増加させるタイミングを統一する。ここで、ヒーター電圧の傾きを求める際に $\Delta t = 10 \text{ s}$ とした。ヒーター電圧およびヒーター電流はサンプリングタイムが 1 s であるため、傾きを求める際にある程度の幅を必要とした。また、例として $\Delta t = 1 \text{ s}$ 、 $\Delta t = 60 \text{ s}$ におけるヒーター電圧の傾きをそれぞれ図 4.3 および図 4.4 に示す。 $\Delta t = 1 \text{ s}$ においては、 1 s 間隔の傾きの値が離散的になってしまい基準に達したかどうかの判断が難しくなってしまう。 $\Delta t = 60 \text{ s}$ においては、 Δt の間隔が大きすぎるためにヒーター電流およびヒーター電圧との時間間隔がずれてしまう。また、 60 s 間隔でヒーター電流の増加の可否を行うとなると点火時間に誤差として大きく影響してしまう。よって、本研究では $\Delta t = 10 \text{ s}$ とし、ヒーター電圧の傾きに一定の基準を設け、その基準を熱平衡点と見なすことでヒーター電流を投入するタイミングを統一化することとした。

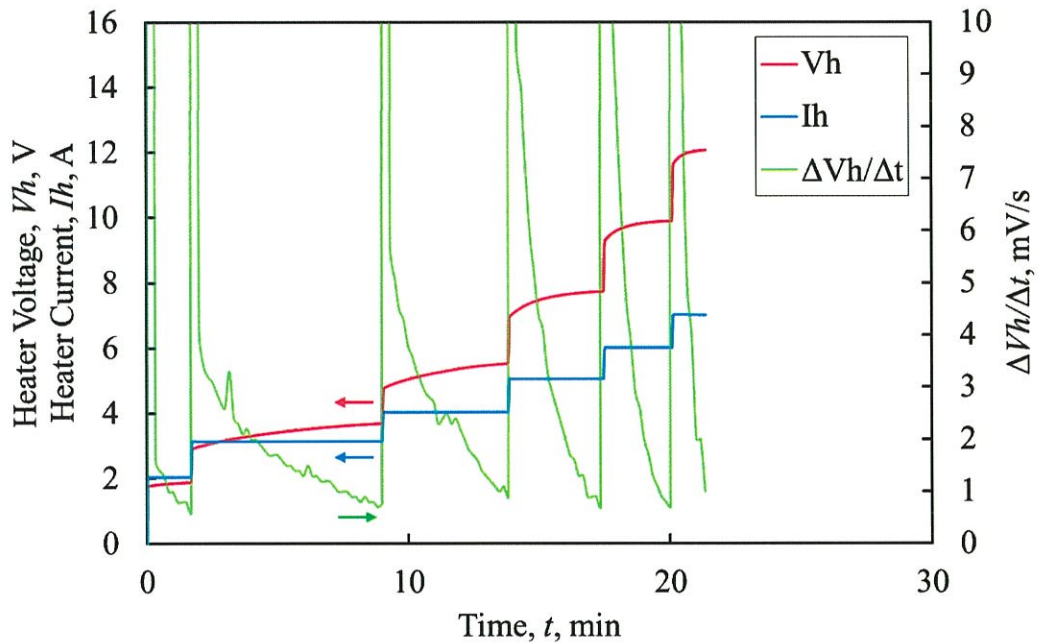


図 4.2 ヒーター電圧の傾き ($\Delta t = 10 \text{ s}$)

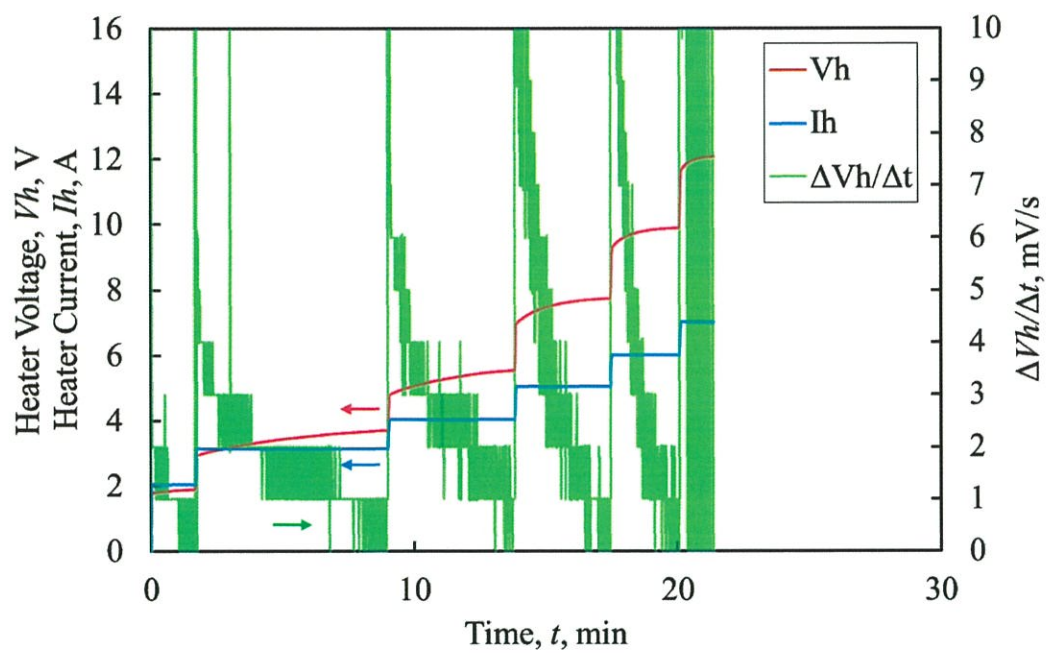


図 4.3 ヒーター電圧の傾き ($\Delta t = 1$ s)

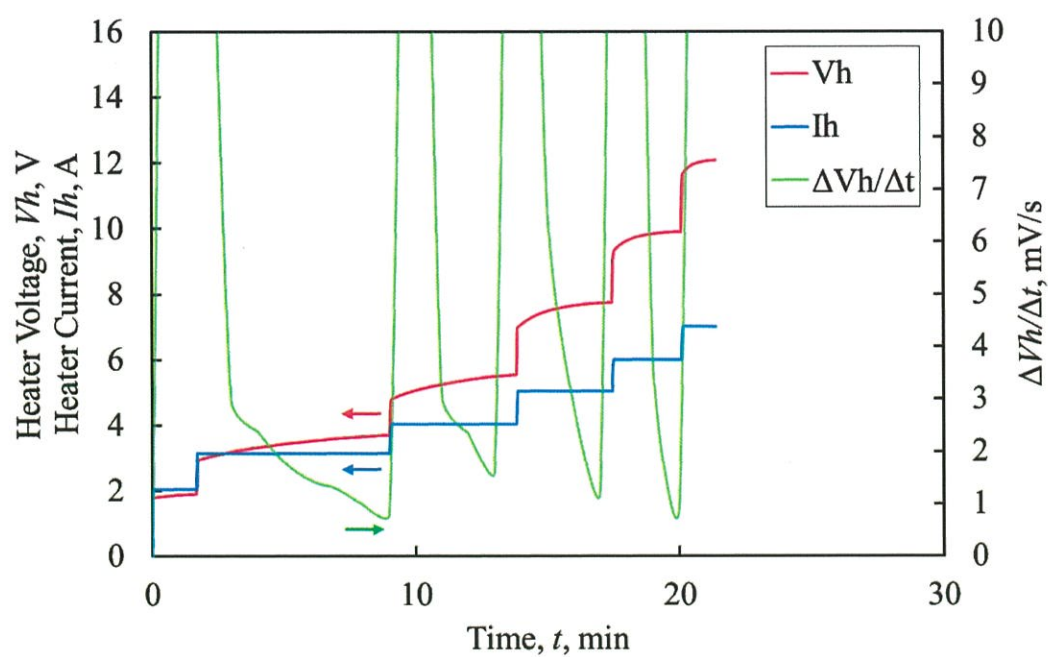


図 4.4 ヒーター電圧の傾き ($\Delta t = 60$ s)

本研究において、図 4.5 のように熱平衡点となる基準を 1 mV/s とした。ヒーター電圧の傾きがこの基準点を下回ったところ、すなわち $\Delta V_h / \Delta t < 1 \text{ mV/s}$ となったときヒーター電流を 1 A 増加させるという手順にした。以下、本研究における全ての実験においてこの手順を採用し、ヒーター電力投入タイミングの統一化を図り、H/C の点火時間を比較する。

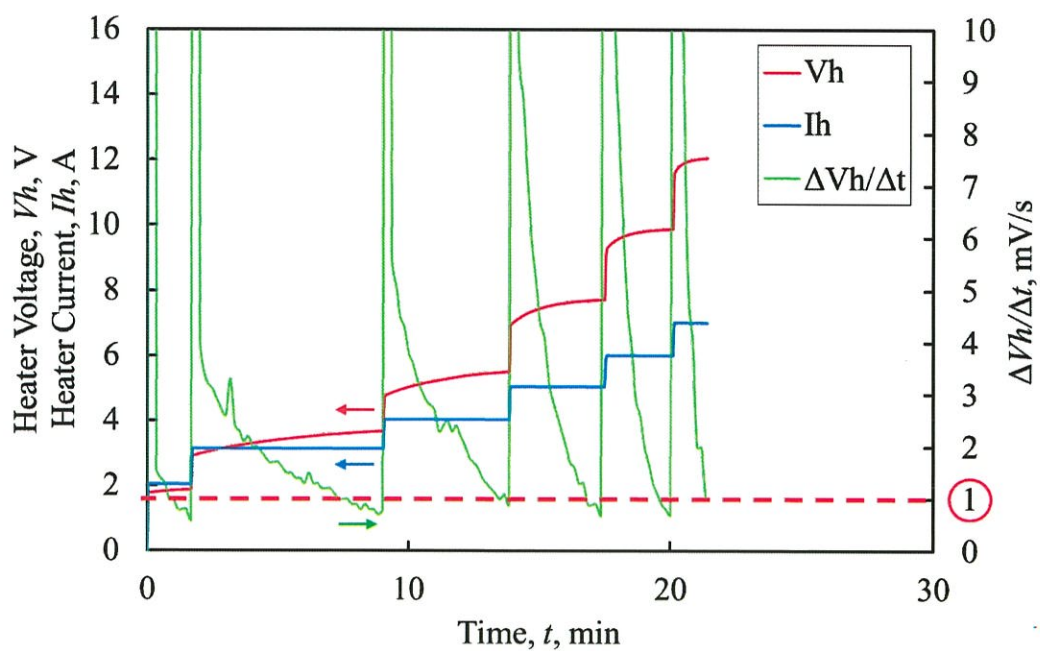


図 4.5 ヒーター電力投入タイミングの基準

4.2 実験構成

本研究で行った実験の構成について記述する。本研究の目的は RF/C が放出する電子が H/C システムにどのような影響を与えるかを調査・評価することである。目標としては RF/C の放出する電子によって H/C の点火までにかかる時間を減らし、またヒーターにかかる電力を減らすことである。つまり、RF/C の放出する電子によって H/C の点火を支援し、ヒーターによる制限を緩和することである。そこで、図 4.6 に示すような実験構成を考案した。まず RF/C を点火させ電子を放出する。H/C のキーパー電極に電圧を印加することで RF/C が放出する電子を H/C 側に引き寄せる。H/C 側にも作動ガスを流し、RF/C が放出する電子と作動ガスが衝突して H/C 内部で電離を起こせばプラズマを生成しやすくなると考えた。このように RF/C が放出する電子を H/C 内部に引き寄せることで H/C の点火の支援を行う。

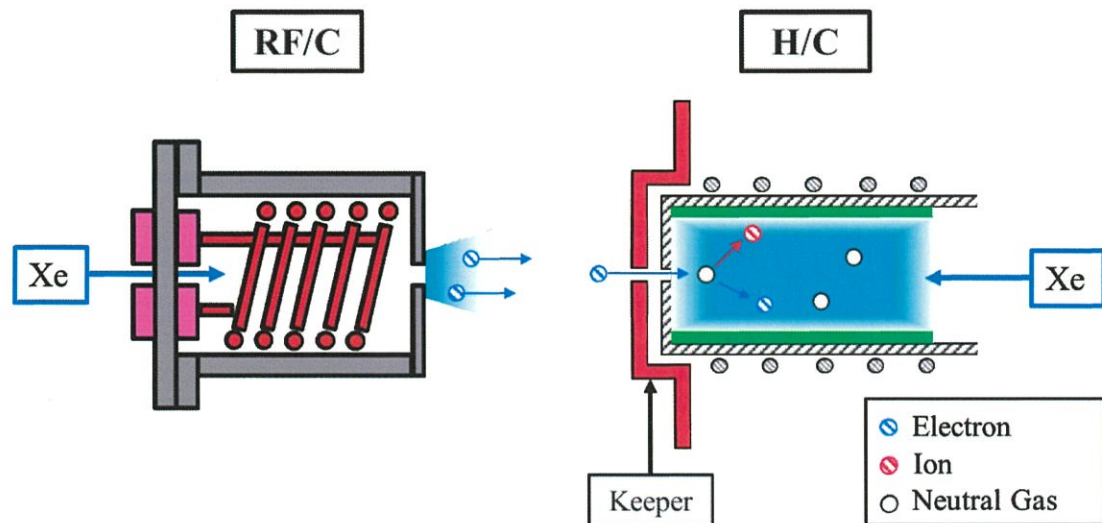


図 4.6 RF/C 放出電子による H/C の点火の支援

本研究では、H/C と RF/C の配置を変更して 3 種類の実験を行った。図 4.7 は H/C と RF/C 組み合わせた実験構成①である。①の実験では H/C と RF/C を対面に配置している。対面に配置することで RF/C が放出する電子を直接 H/C 内部に送り込むことが狙いである。H/C-RF/C 間の距離は 50 mm である。H/C には、ヒーター電源およびキーパー電源を使用しそれぞれ電力を投入している。RF/C の放出電子には高周波成分が含まれているため、高周波ノイズが電源に侵入するのを防ぐために LPF を挿入した。RF/C には、高周波電力を投入するための高周波電源とインピーダンスマッチングを行うためのマッチングボックスを使用した。マッチングボックスは真空槽内に設置し、真空槽外からコントローラーによって操作した。また、RF/C コールド側-マッチングボックス間にブロッキングキャパシタ (Blocking Capacitor: BC) を挿入している。

BC は、アンテナコイルを接地電位から浮かせることでイオンによるスパッタを抑制するためである¹³⁾。作動ガスは H/C、RF/C ともにキセノンを使用した。H/C の流量 \dot{m}_{HC} と RF/C の流量 \dot{m}_{RFC} はそれぞれ流量調整器 (MFC) を介して流量を調整している。測定項目は、ヒーター電流 I_h 、ヒーター電圧 V_h 、キーパー電流 I_k 、キーパー電圧 V_k 、H/C のリターン電流 I_r 、RF/C のリターン電流 I_c である。図中の矢印は電流の向きである。

図 4.8 に H/C と RF/C 組み合わせた実験構成②を示す。②の実験では H/C と RF/C を軸が平行になるように配置している。H/C と RF/C を対面に配置した状態ではスラスタと組み合わせることはできないが、H/C と RF/C を軸が平行になるように配置することでスラスタと組み合わせた際にこの配置を保った状態で組み合わせることができるためスラスタ搭載を想定した配置である。②の実験では、H/C-RF/C 間の距離は 100 mm である。H/C および RF/C の放電室径を考慮すると平行に配置した状態では距離が①に比べると離れてしまう。カソードの配置以外の実験の構成要素は①と同じである。

図 4.9 に H/C と RF/C を組み合わせた実験構成③を示す。③の実験は②の平行に配置した状態から H/C の軸を 45° 傾けた配置である。軸を傾けることでスラスタ搭載を想定した配置を維持しつつ、②の配置よりも H/C 側へ電子を引き込みやすくすることが狙いである。また、軸を傾けることで H/C-RF/C 間の距離を近づけることができる。H/C-RF/C 間の距離は、①と同じく 50 mm である。以上の 3 種類の実験に加えて H/C 単体で点火をさせた時の点火時間およびヒーター電力を測定し比較を行った。

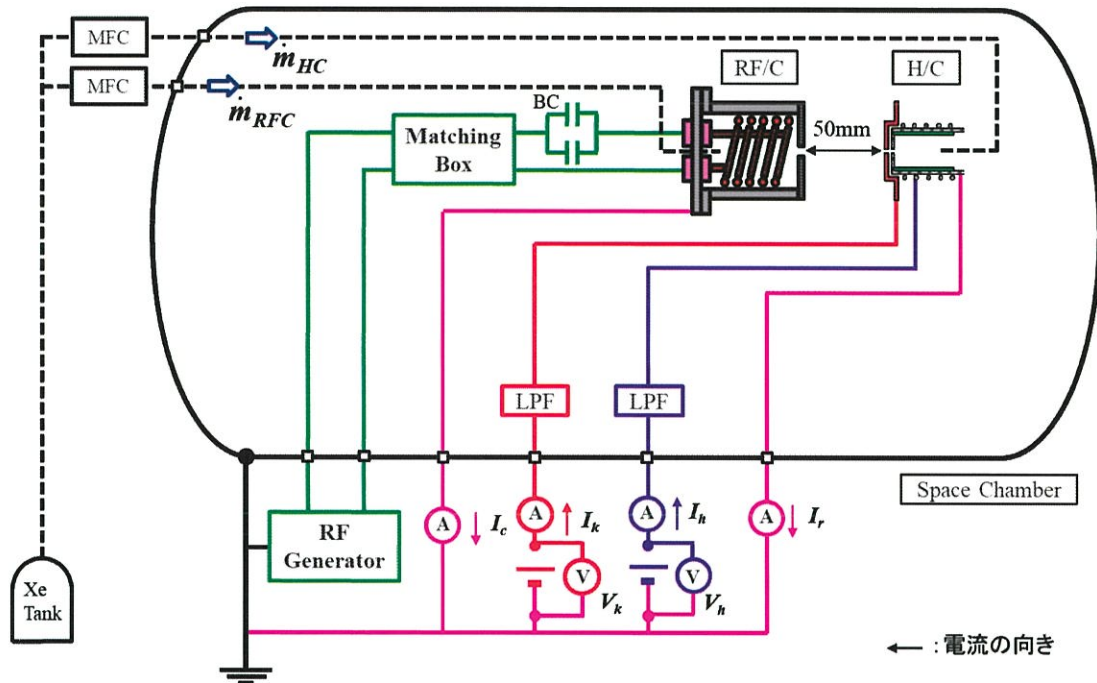


図 4.7 H/C+RF/C 実験構成①

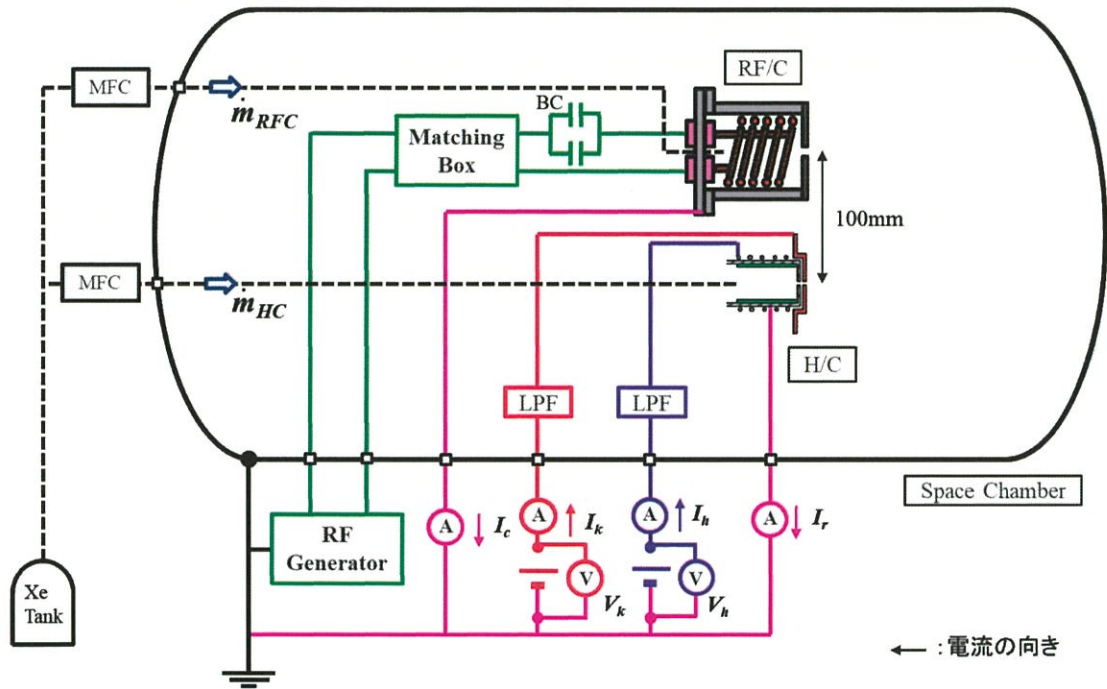


図 4.8 H/C+RF/C 実験構成②

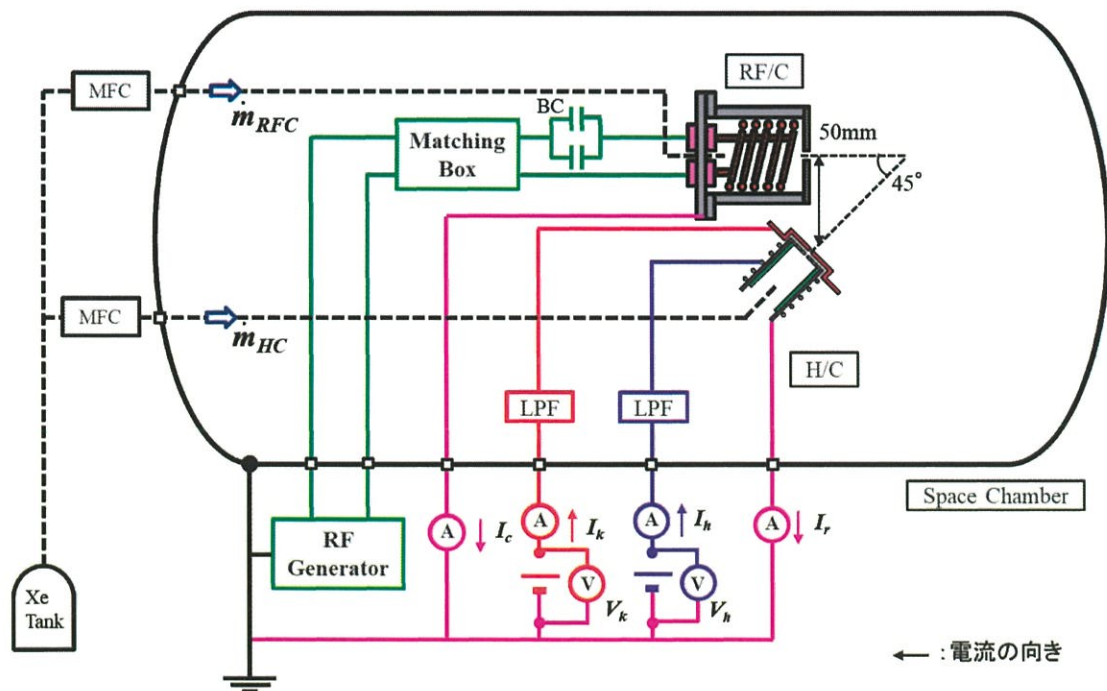


図 4.9 H/C+RF/C 実験構成③

4.3 実験条件

表 4.1 に H/C の実験条件を示す。H/C の作動ガスはキセノンを使用した。キセノンガスの流量は 10 sccm である。ヒーター電源は定電流で電力を投入する。1 A ずつ電流値を増加しヒーターを加熱していく。キーパー電源は定電圧で作動させ、制限電流を 0.8 A とした。H/C 点火前はキーパー電極に任意の電圧を印加し、点火後は放電によってキーパーに 0.8 A 流れプラズマを維持できるようにした。キーパー電圧は 50 V もしくは 70 V とした。電圧を変更することで RF/C が放出する電子の量を調節し比較を行うためである。

表 4.1 H/C の実験条件

Hollow Cathode	
Gas	Xe
Keeper Voltage, V_k , V	50, 70
Keeper Current, I_k , A	0.8
Mass Flow Rate, \dot{m}_{HC} , sccm	10

表 4.2 に RF/C の実験条件を示す。H/C 同様 RF/C の作動ガスはキセノンを使用した。RF/C は、点火前はプラズマを生成するために流量を 5 sccm 流している、作動ガス投入後、高周波電力 20 W を投入してインピーダンスマッチングを行うことで点火する。作動周波数は 13.56 MHz である。点火後は流量 1 sccm、高周波電力を 50 W もしくは 100 W にして電子を放出する。RF/C における消費電力は H/C における消費電力に比べると大きいのでできるだけ消費電力を減らすことが必要である。よって、高周波電力を変更して H/C システムに与える影響にどのような違いがあるかを比較する。

表 4.2 RF/C の実験条件

RF Cathode	
Gas	Xe
Frequency, f , MHz	13.56
RF Power, P_{RF} , W	50, 100
Mass Flow Rate, \dot{m}_{RFC} , sccm	1

4.4 実験手順

図 4.10 に本研究における実験手順を示す。本研究では RF/C が放出する電子の影響を評価するために H/C 点火前に RF/C の点火を行い、電子を放出する。RF/C 点火後、H/C に作動ガスを投入しキープ電圧を印加する。一般的な H/C の点火手順では、ヒーターによる加熱を行い放電可能温度まで到達したところで作動ガスを投入しキープ電圧を印加するところで放電を開始するが、本研究では H/C の点火時間を測定するために予め作動ガスとキープ電圧を投入することで点火までの最短時間を測定する。キープ電圧を印加後、ヒーターによる加熱を開始する。 $I_h = 2\text{ A}$ からスタートし、以降は 4.1 において定めた熱平衡点の基準に従って 1 A ずつ電流値を増加していく。放電可能温度まで到達すると H/C が点火し、H/C 点火後は RF/C を停止させても放電を維持することができる。ヒーター電力投入から H/C 点火までを点火時間とし、点火までのヒーター電力を測定し比較を行った。RF/C の点火を即時行うことができるので点火時間には含めず、H/C の点火時間がシステム全体の点火時間と等しいと言える。

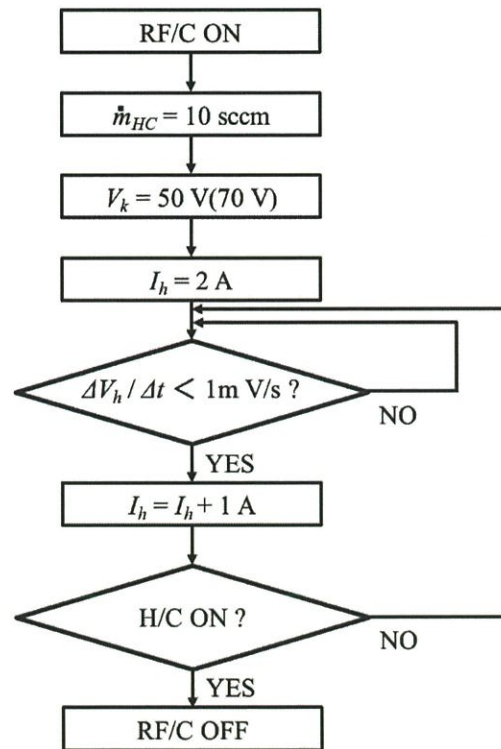


図 4.10 実験手順

RF/C が放出する電子がインサートの加熱に影響を与えているかを評価するために、シーケンスを変更して実験を行った。図 4.11 はシーケンス変更後の実験手順である。図 4.10 の実験手順との変更点は RF/C の点火タイミングである。図 4.10 の実験手順ではヒーター電力を投入する前に RF/C を点火した。しかし、図 4.11 ではヒーター電力投入後、ヒーター電流 6 A に達したところで RF/C を点火するように変更した。2 種類の実験手順で点火時間に差ができれば、RF/C が放出する電子がインサートの加熱に与える影響を評価できる。また、 $I_h = 6 \text{ A}$ に達したところで RF/C を点火する理由は、図 4.10 の実験手順において H/C が最短で点火したタイミングが $I_h = 6 \text{ A}$ のときであったためである。 $I_h = 6 \text{ A}$ までの加熱時間において、RF/C が放出する電子がインサートの加熱に影響を与えているのであれば、実験手順変更することで H/C の点火時間およびヒーター電力に差ができると考えたからである。よって、RF/C の点火タイミングを変更することによって H/C システムにどのような影響を与えるかを評価する。

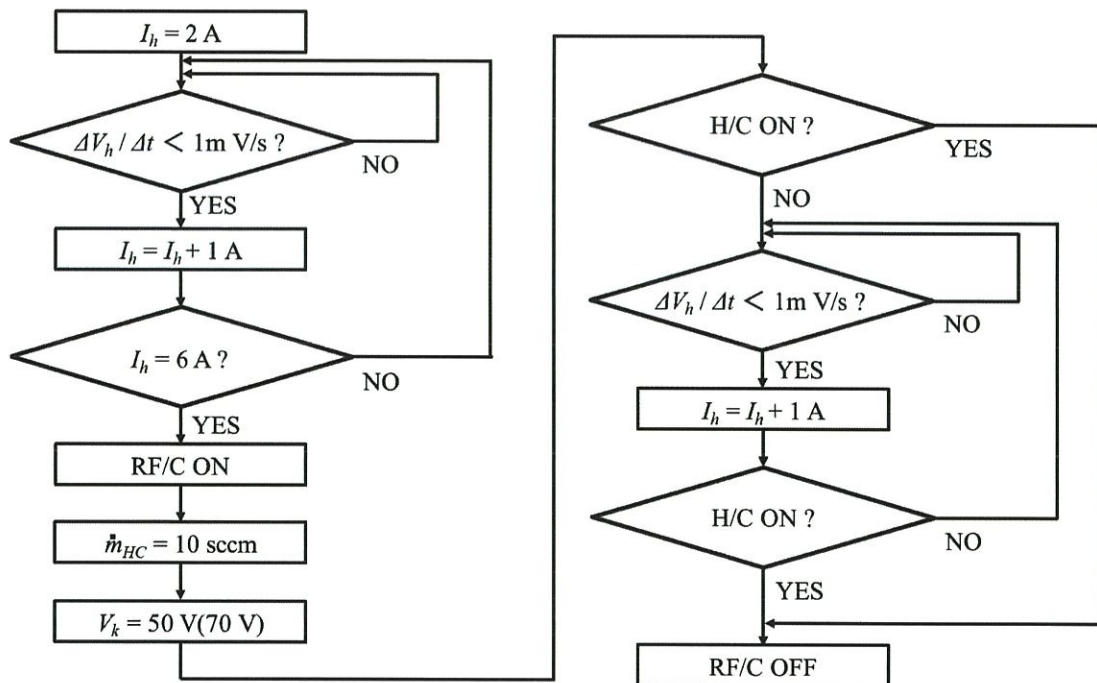


図 4.11 シーケンス変更後実験手順

第5章 実験結果および考察

5.1 ホローカソードと RF カソードの組み合わせ作動

5.1.1 実験結果

図 5.1 に H/C と RF/C を組み合わせた 3 種類の実験（以下、H/C+RF/C）と H/C 単体で点火させたときの点火時間およびヒーター電力の実験結果を示す。キーパー電圧は 50 V、高周波電力は 100 W である。また、H/C+RF/C では図 4.10 の手順に従い RF/C を先に点火させた。

H/C+RF/C_①~③と H/C 単体における点火時間およびヒーター電力を比較すると、カソードを対面に配置した H/C+RF/C_①とカソードを平行に配置し H/C の軸を 45° 傾けた H/C+RF/C_③において点火時間の短縮およびヒーター電力の減少が確認された。H/C 単体における点火時間は 22 分、ヒーター電力 115 W 程度であった。それに対し、H/C+RF/C_①では、点火時間 15 分、ヒーター電力 70 W 程度であった。H/C+RF/C_③では点火時間 18 分、ヒーター電力 65 W 程度であった。カソードを平行に配置した H/C+RF/C_②においては、H/C 単体の点火時間およびヒーター電力と変わらない結果となった。H/C+RF/C_②における点火時間は 21 分、ヒーター電力は 110 W 程度であった。以上より、H/C+RF/C_①および H/C+RF/C_③の実験に関しては H/C と RF/C を組み合わせることで H/C の点火が促進されたといえる。点火時間が短縮されたことでヒーターの加熱にかかる時間を短縮できる。また、ヒーター電力が減少されたことでヒーターにかかる負荷を低減できる。よって、H/C と RF/C を組み合わせることでヒーターによる制限が緩和されたといえる。

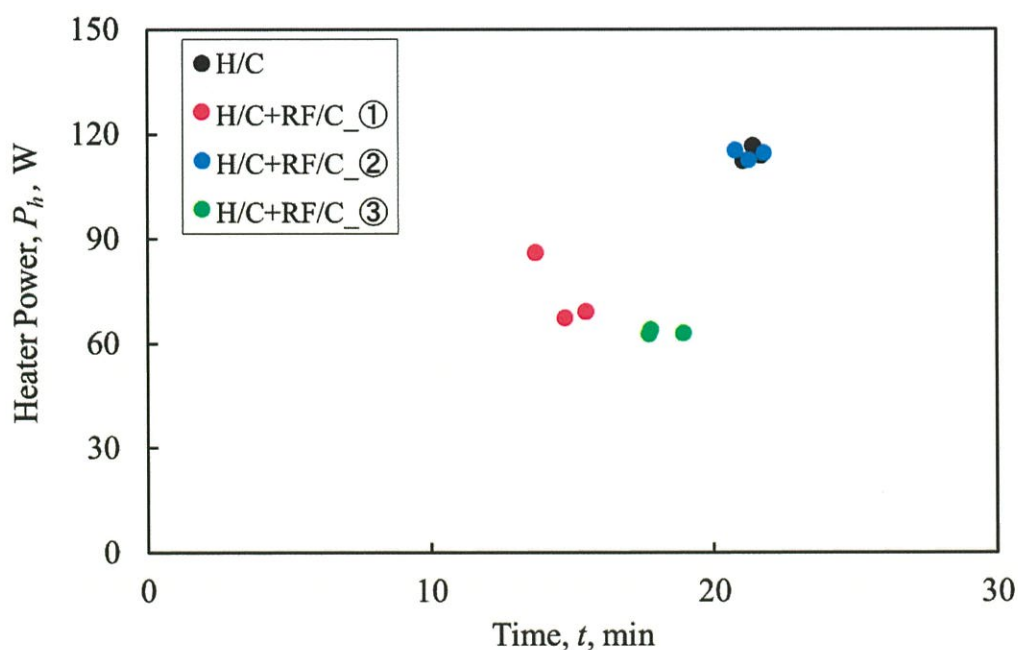


図 5.1 H/C+RF/C 組み合わせ実験結果

5.1.2 キーパー電流

図 5.1 において H/C 単体と H/C+RF/C_①~③において点火時間およびヒーター電力に差が生まれた理由について考察する。本実験において、RF/C を点火させ H/C 側に電子を放出する際に H/C のキーパー電極に正電圧を印加しているため、RF/C の放出した電子がキーパー電極に流れ込む。これは、キーパー電極が図 3.3 のダイオードコンフィグレーションにおけるアノードの役割を果たし、電子を引き寄せているからである。キーパー電極に流れ込む電子は、キーパー電流として測定することができる。キーパー電流は電子電流であるため、電子を放出した RF/C にはリターン電流が流れる。よって、キーパー電流および RF/C のリターン電流を測定することで H/C に影響を与えている電子の量を見積もることができる。

図 5.2 は、H/C 単体で点火させたときの点火までのキーパー電流の時間履歴である。一般的に H/C 単体で点火を行うとき、キーパー電流はヒーターによる加熱中は 0 A である。放電可能温度に到達し点火をすると、絶縁破壊によってキーパーに電流が流れキーパー電圧が下がりプラズマが維持される。図 5.2 において、点火前はキーパー電流 $I_k = 0$ A、RF/C は使用していないので RF/C のリターン電流 $I_e = 0$ A、キーパー電極へは加熱開始時から正電圧を印加しているためキーパー電圧 $V_k = 50$ V である。点火後はキーパー電圧が下がり、 $I_k = 0.8$ A 流れているのがわかる。

図 5.3、図 5.4、図 5.5 はそれぞれ H/C+RF/C_①~③におけるキーパー電流の時間履歴である。H/C 単体と比較すると、点火前の加熱中にキーパー電流が流れている。H/C+RF/C_①および H/C+RF/C_③においては 0.2~0.3 A 程度、H/C+RF/C_②においては 0.02 A 程度の電流が流れている。また、キーパー電流 I_k は RF/C のリターン電流 I_e と一致しているため、キーパー電流は RF/C から放出された電子による電子電流であるといえる。また、キーパー電流の振動をオシロスコープによって測定したところ 13.56 MHz がのっていることを確認した。

H/C+RF/C_①および H/C+RF/C_③では、図 5.1 より H/C の点火時間が短縮されヒーター電力が減少した。これは、図 5.3 および図 5.5 においてキーパー電流が 0.2~0.3 A 程度流れていることから RF/C が放出した電子による影響であるといえる。よって、RF/C が放出した電子が H/C の点火を促進し、ヒーターによる制限を緩和したといえる。

H/C+RF/C_②では、図 5.1 において H/C 単体と比較して点火時間およびヒーター電力に変化が見られなかった。これは H/C の点火に影響を与える電子の量が少なかったからであると思われる。H/C+RF/C_②では 0.02 A 程度しかキーパー電流が流れていないことから、電子による影響がほとんどないといえる。H/C+RF/C_②においてキーパー電流が小さい要因としてカソード間距離が挙げられる。H/C+RF/C_①および H/C+RF/C_③ではカソード間距離は 50 mm である。それに対し H/C+RF/C_②ではカソード間距離は 100 mm である。距離が遠いため電子を H/C 側まで引き出せなかった可能性がある。

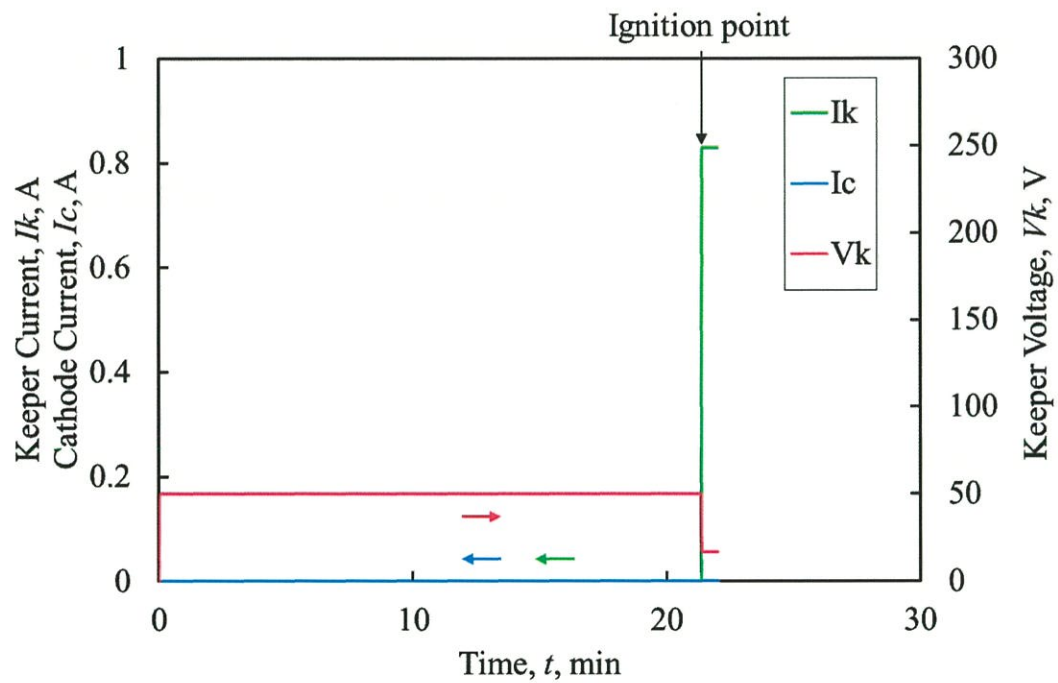


図 5.2 H/C 単体におけるキーパー電流の時間履歴

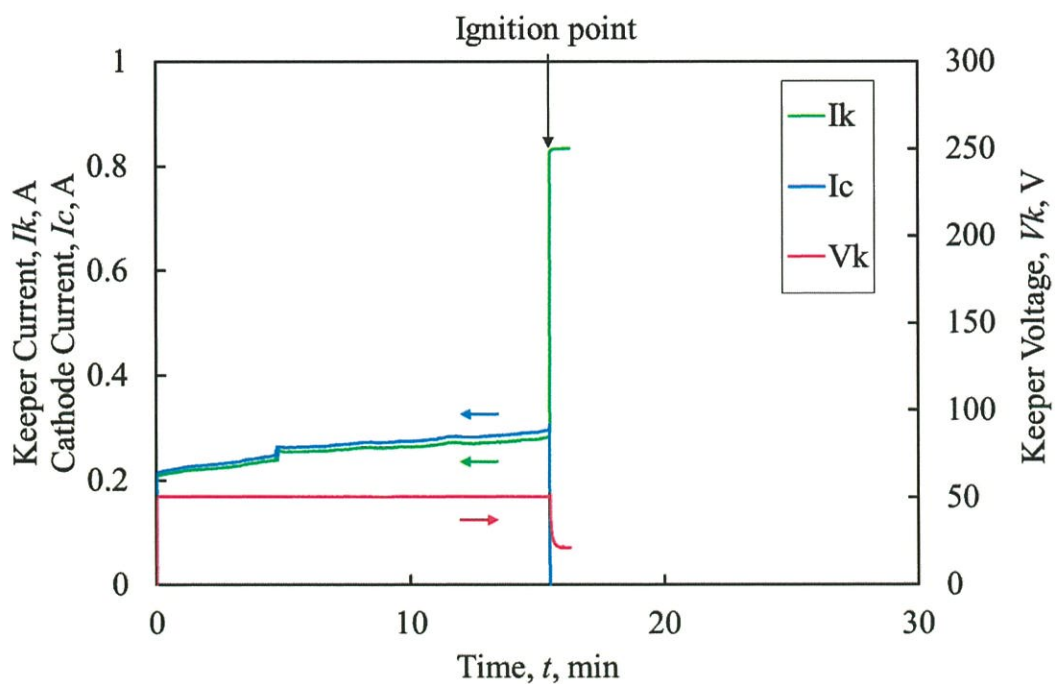


図 5.3 H/C+RF/C_①におけるキーパー電流の時間履歴

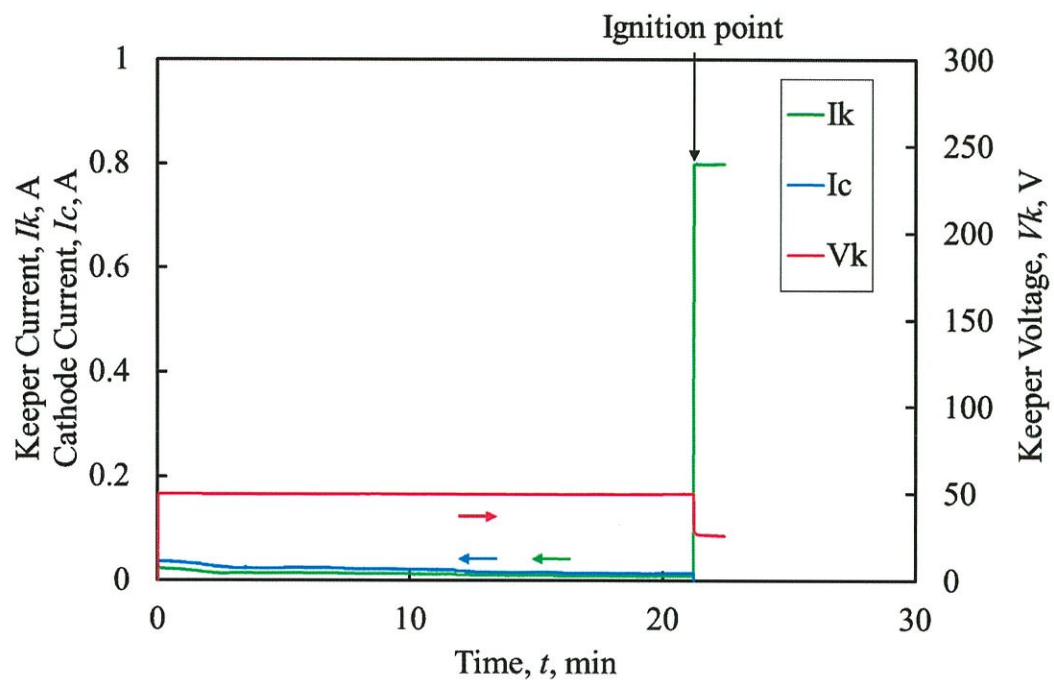


図 5.4 H/C+RF/C_②におけるキーパー電流の時間履歴

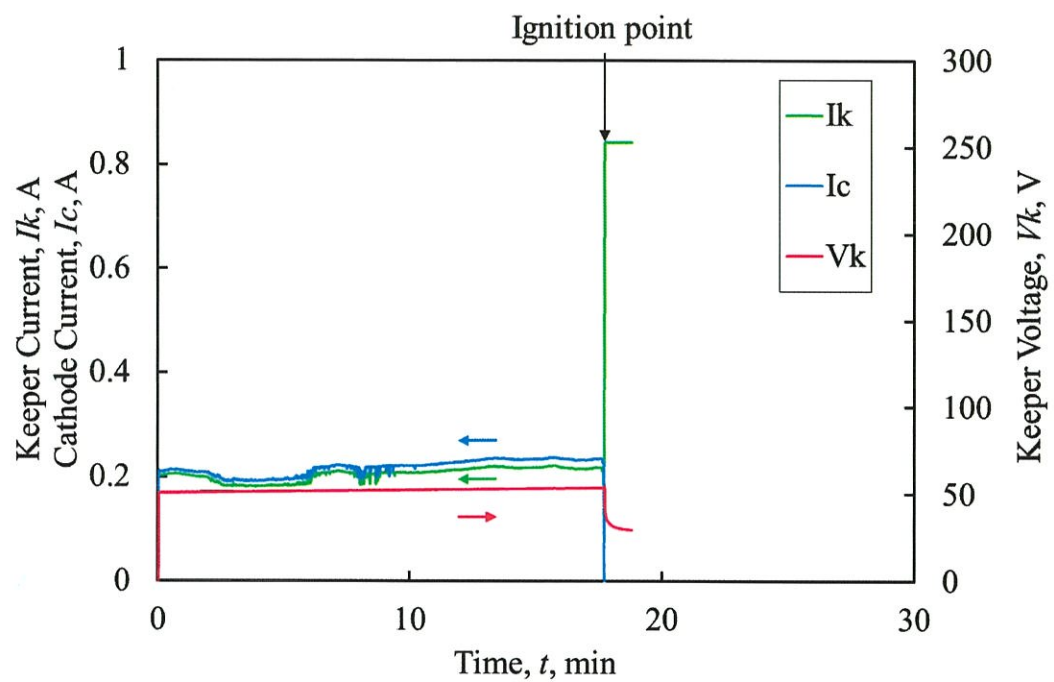


図 5.5 H/C+RF/C_③におけるキーパー電流の時間履歴

5.1.3 容量結合プラズマ

図 5.6 に示すように H/C 側に容量結合プラズマが生成されたのが確認された。H/C+RF/C_③において、RF/C を点火し作動ガスを投入すると、図 5.6 のような発光が H/C 側に見られた。さらにキーパー電圧を印加すると発光が強くなり、RF/C から電子が引き出されているのが確認できた。これは、2.3.3 で述べた RF/C をホールスラストと組み合わせた際の現象と似ている。図 5.6 の発光も容量結合プラズマであると考えられ、容量結合プラズマによって H/C 内部のプラズマが生成しやすくなり点火時間が短くなったと考えられる。また、この現象は H/C+RF/C_①および H/C+RF/C_②においても確認された。

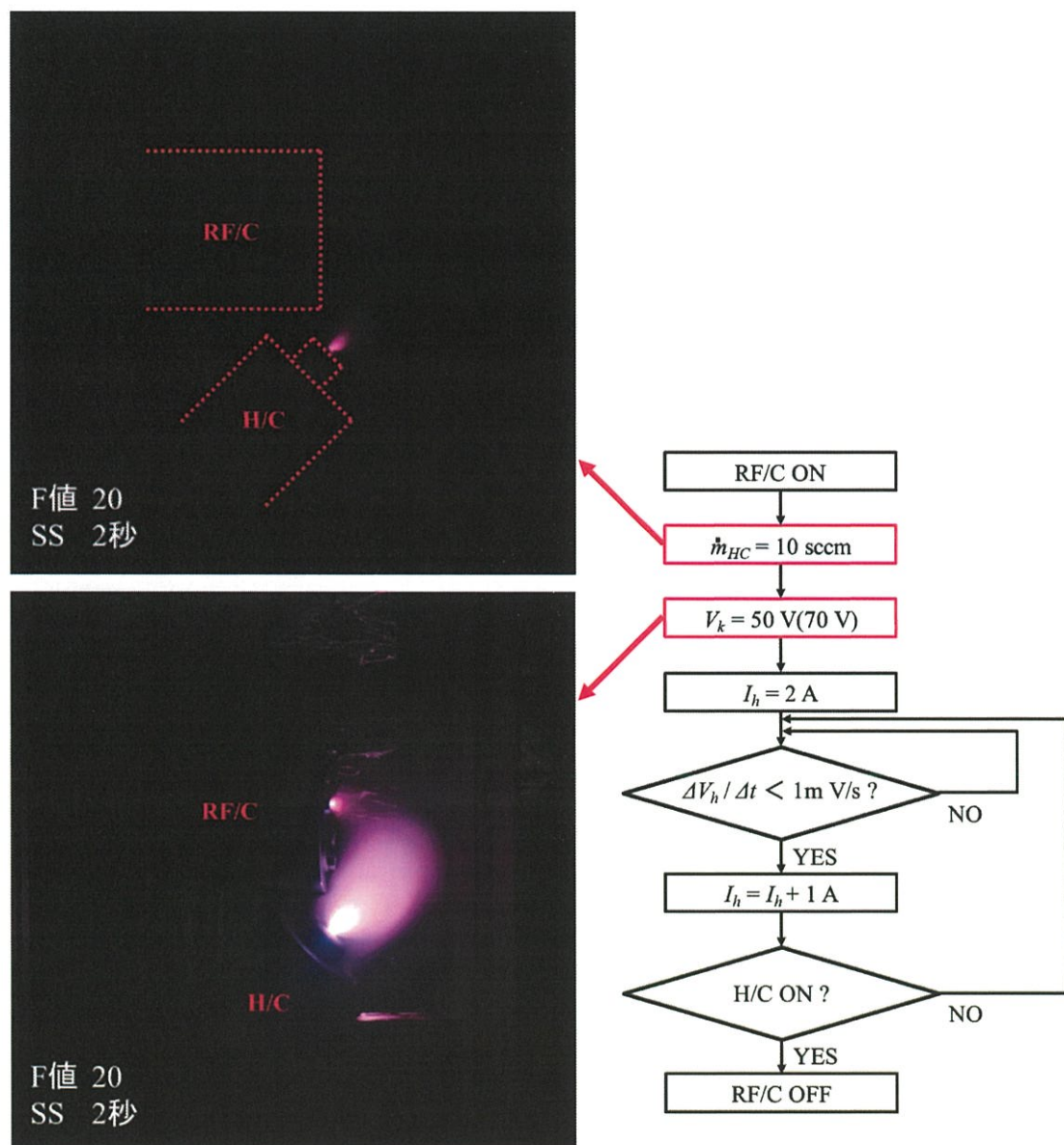


図 5.6 H/C 点火前の容量結合プラズマ生成の様子

5.2 キーパー電圧変更実験

5.2.1 実験結果

H/C+RF/C_②および H/C+RF/C_③においてキーパー電圧を変更して実験した。H/C+RF/C_②ではカソード間距離が 100 mm であったためキーパーに流れる電子電流が少なかった。よって、電子をより多く引き出すために $V_k = 50 \text{ V}$ から $V_k = 70 \text{ V}$ に変更して実験を行った。

図 5.7 に実験結果を示す。一般的に、キーパー電圧を上げることで H/C 内部の放電は起きやすくなるため H/C は点火しやすくなる。H/C 単体における実験でも図 5.7 よりヒーター電力が減少しているのがわかる。しかし、点火時間には大きな差は見られなかったため、キーパー電圧を $V_k = 50 \text{ V}$ から $V_k = 70 \text{ V}$ にした程度では大きな影響はないと思われる。H/C+RF/C_②においては、点火時間が短縮されヒーター電力も減少した。 $V_k = 70 \text{ V}$ にしたことで $V_k = 50 \text{ V}$ に比べてより多くの RF/C 放出電子の影響を受けたと考えられる。H/C+RF/C_③においては、ヒーター電力に差はなかったが点火時間は短縮された。H/C+RF/C_③においてもより多くの RF/C 放出電子の影響を受けたため点火時間が短くなったと考えられる。しかし、ヒーター電力に差が見られなかったことから、インサートの加熱に大きな影響を与えていない可能性がある。これは、RF/C が放出する電子の量が増えていても H/C 内部まで届かずキーパーに流れ込んでいられると思われる。

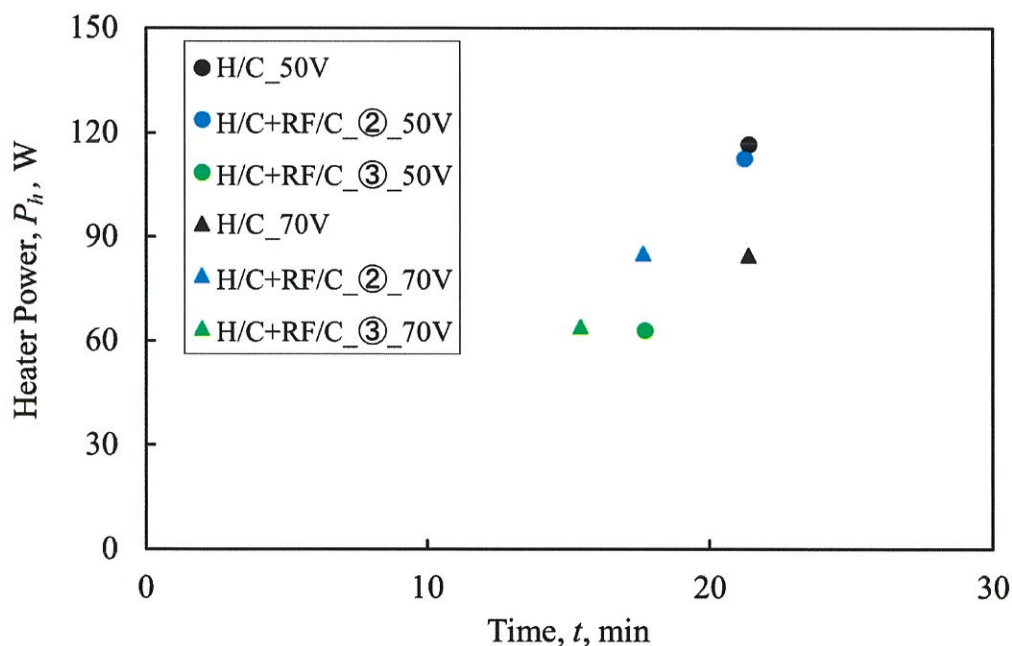


図 5.7 キーパー電圧変更実験結果

5.2.2 キーパー電流

図 5.8 および図 5.9 に H/C+RF/C_②および H/C+RF/C_③の $V_k = 70 \text{ V}$ におけるキーパー電流の時間履歴を示す。ヒーター加熱開始時、どちらも 0.7 A 程度のキーパー電流が流れているのがわかる。 $V_k = 50 \text{ V}$ の実験よりも多くの電子がキーパーに流れ込んでいるのがわかる。キーパーに流れる電子電流が大きくなったことで点火がさらに促進されたといえる。

図 5.8 と図 5.9 を比較すると、H/C+RF/C_③においては点火直前までキーパーに 0.7 A 程度の電子電流が流れているのがわかる。しかし、H/C+RF/C_②においては時間とともにキーパー電流が小さくなっている。また、RF/C のリターン電流と一致していない。加熱開始時に 0.7 A 程度流れていた電子電流が点火直前には 0.2 A 程度まで下がっている。これは配置による問題であると思われる。カソードを平行に配置している H/C+RF/C_②では 5.1.3 で示した容量結合プラズマが、H/C+RF/C_③に比べて真空空間中に大きく広がってしまう。容量結合プラズマのプラズマ密度が小さくなってしまいうためにプラズマが不安定になる。インサートの加熱が進むと H/C 内部に弱電離プラズマが生成し始めるので、RF/C による容量結合プラズマが H/C 内部のプラズマの影響を大きく受けてしまったため電流値が減少したと考えられる。また、キーパー電流が RF/C のリターン電流と一致しない理由については、容量結合プラズマが大きく広がっているため、RF/C が放出した電子が全てキーパーに流れ込むことなく、真空槽壁などに流れ込んでいる可能性がある。しかし、点火直前においても 0.2 A 程度の電子電流が流れていることから $V_k = 50 \text{ V}$ の実験と比較すると RF/C が放出した電子の影響を大きく受けていると判断できるため点火時間が短縮されヒーター電力が減少したと考えられる。

H/C+RF/C_③においては、 $V_k = 50 \text{ V}$ の実験と比較すると倍以上の電子電流がキーパーに流れていたにも関わらず点火時間は短縮されたがヒーター電力は減少しなかった。これは、キーパーに流れる込む電子は多くなったが H/C 内部まで届く電子の量は大きく変わらなかったと思われる。H/C 内部まで届かなければインサートの加熱に与える影響は少ないと考えられるのでヒーター電力への影響も少ないと考えられる。よって、さらに点火時間の短縮やヒーター電力の減少を試みるためには、さらに多くの RF/C が放出した電子を H/C 内部にまで届かせる必要がある。

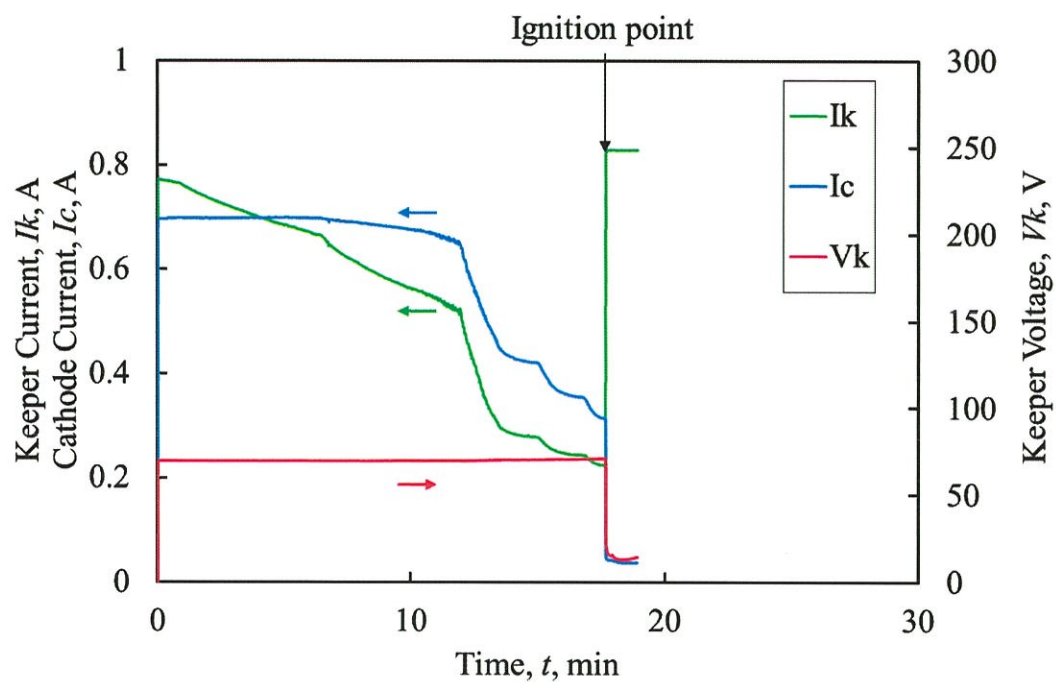


図 5.8 H/C+RF/C_②におけるキーパー電流の時間履歴 ($V_k = 70$ V)

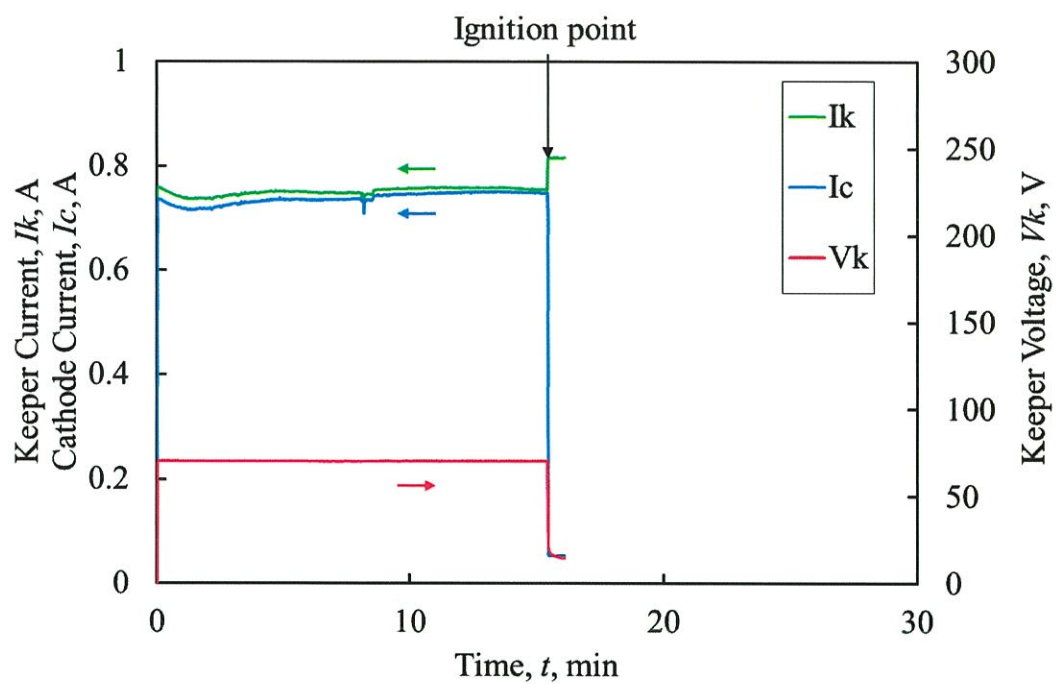


図 5.9 H/C+RF/C_③におけるキーパー電流の時間履歴 ($V_k = 70$ V)

5.3 高周波電力変更実験

5.3.1 実験結果

H/C+RF/C_②およびH/C+RF/C_③において高周波電力を変更して実験を行った。高周波電力 $P_{RF}=100\text{ W}$ を $P_{RF}=50\text{ W}$ に変更することでシステム全体としての消費電力の減少させることが目的である。図 5.10 に実験結果を示す。H/C+RF/C_②およびH/C+RF/C_③のどちらにおいても点火時間およびヒーター電力に変化は見られなかった。よって、 $P_{RF}=50\text{ W}$ で作動させた方がシステム全体としての消費電力が少なく済む。消費電力と点火時間およびヒーター電力を考慮して最適な動作点を設定できると思われる。

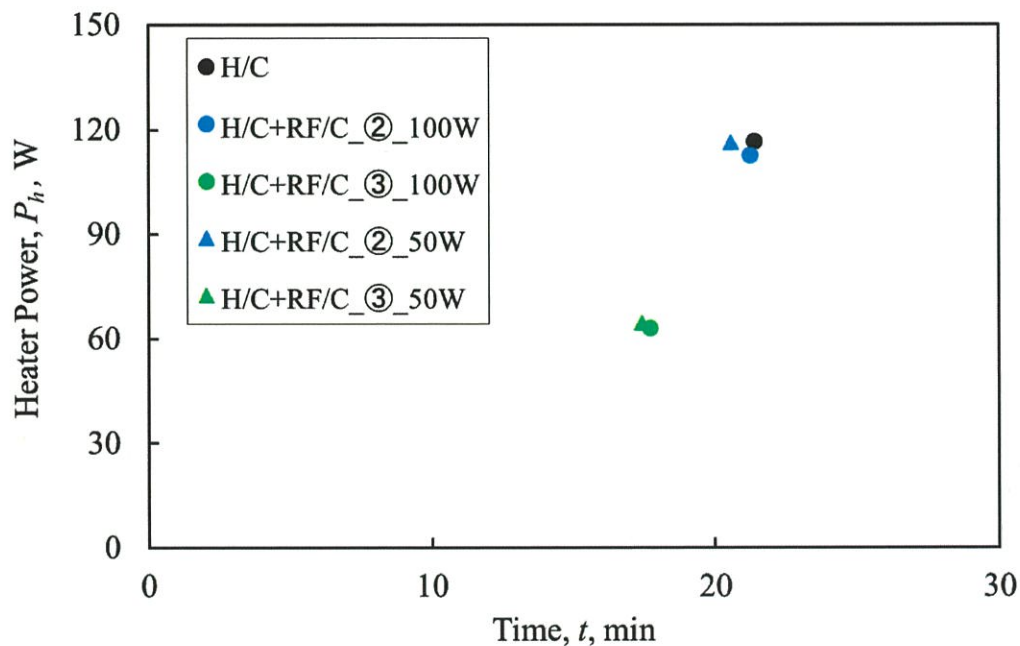


図 5.10 高周波電力変更実験結果

5.3.2 キーパー電流

図 5.11 および図 5.12 にそれぞれ H/C+RF/C_②および H/C+RF/C_③の $P_{RF}=50\text{ W}$ におけるキーパー電流の時間履歴を示す。どちらも図 5.4 および図 5.5 における $P_{RF}=100\text{ W}$ のキーパー電流と比べても電流値に差はない。H/C に影響を与える電子の量に差がないことから点火時間およびヒーター電力に変化がなかったと思われる。RF/C において、引き出せる最大の電子電流は $P_{RF}=50\text{ W}$ よりも $P_{RF}=100\text{ W}$ の方が大きい。しかし、キーパー電圧 $V_k=50\text{ V}$ においてはどちらにおいても引き出せる最大の電子電流ではない可能性がある。よって、キーパーに流れる電子電流に差はなかったと思われる。

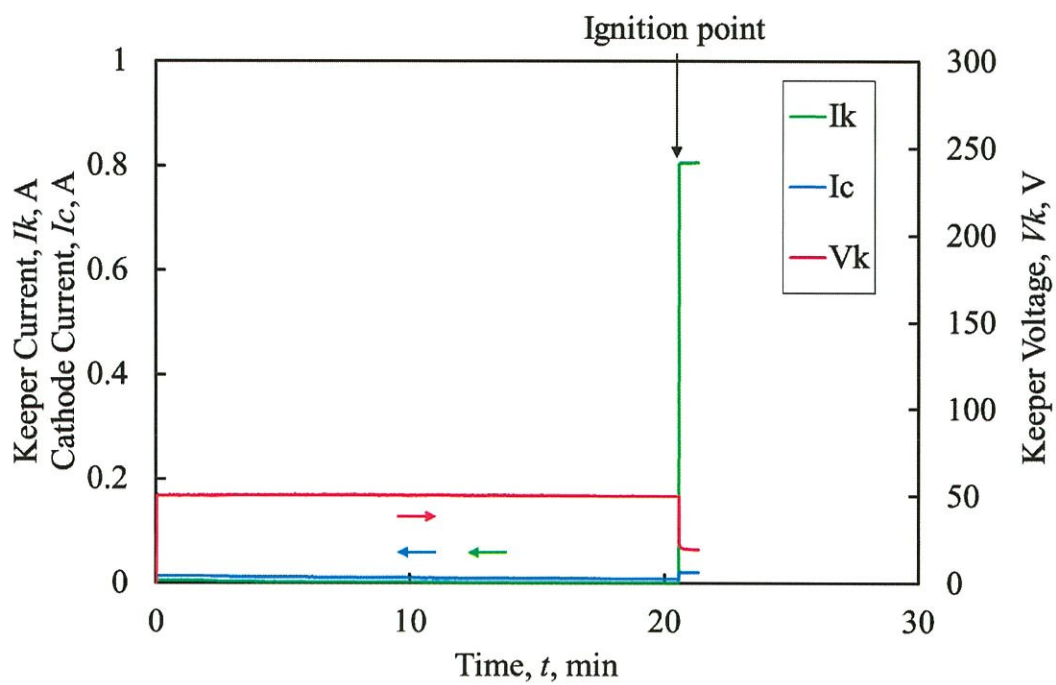


図 5.11 HC+RFC_②におけるキーパー電流の時間履歴 ($P_{RF} = 50$ W)

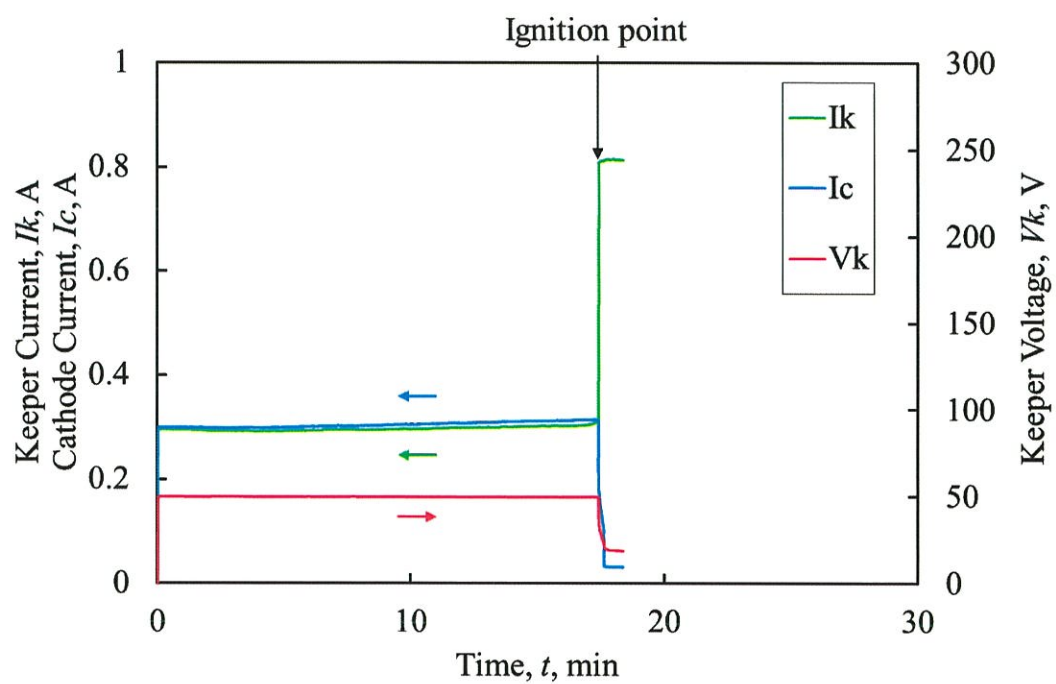


図 5.12 HC+RFC_③におけるキーパー電流の時間履歴 ($P_{RF} = 50$ W)

5.3.3 投入電力およびエネルギー評価

高周波電力変更実験において、H/C+RF/C_②およびH/C+RF/C_③における投入電力およびトータルエネルギーについてH/C単体における実験と比較した。表5.1はそれぞれの実験における投入電力およびエネルギーの一覧である。一般的にH/Cにおいて最も電力を消費するのはヒーターである。しかし、点火後はスラスタにおけるアノードとの放電によって自己加熱されるのでヒーターをオフにする場合が多い。よって、H/Cにおいて最も電力を消費するのはヒーター電力を最大に投入する点火直前である。

表5.1より、H/C単体において投入電力はヒーター電力のみである。一方、H/C+RF/C_②およびH/C+RF/C_③ではキーパーに電流が流れるためキーパー電力が発生する。また、システム全体を考慮するとRF/Cで高周波電力を消費するため、H/C+RF/Cではトータルの消費電力は大きくなる。H/C+RF/C_③の実験ではヒーター電力が大きく減少している。また、 $P_{RF} = 50 \text{ W}$ のときはトータルの消費電力も大きく抑えることができ、かつ点火時間も短縮された。よって、H/CとRF/Cを組み合わせたシステムはH/C単体と比較して、同程度の消費電力で点火時間を短縮しヒーターにかかる負荷を低減させることができるといえる。

表5.1におけるトータルエネルギーはH/Cのヒーターによる加熱開始から点火までの消費電力を時間積分したものである。H/C+RF/C_③において、ヒーターのみ考慮するとH/C単体と比較してトータルエネルギーが減少している。しかし、RF/Cにおけるエネルギーを考慮するとトータルエネルギーは大きくなる。これは、投入したエネルギーを効率よくインサートの加熱に利用できていない可能性がある。しかし、H/C+RF/C_②とH/C+RF/C_③を比較すると配置や電力の投入の仕方によって大きくエネルギーが減少している。よって、H/CとRF/Cの組み合わせ方や動作点を変更することによって、さらに効率よくRF/Cが放出した電子の影響をH/Cに与えることができると考えられる。

表 5.1 投入電力およびエネルギーの一覧

		H/C	H/C+RF/C_②		H/C+RF/C_③	
Power, W	Heater	118	113	117	63.6	64.3
	Keeper	0	1.20	0.30	11.9	15.7
	RF	0	100	50	100	50
	Total	118	214	167	175	130
Total Energy, kJ	Heater	43.7	45.0	39.3	25.4	25.4
	Heater + Keeper	43.7	45.8	39.5	36.8	40.9
	Heater + Keeper + RF	43.7	173	101	143	93.2
Time, min		21.4	21.2	20.5	17.7	17.4

5.4 点火手順変更実験

5.4.1 実験結果

5.1~5.3 より RF/C が放出した電子が H/C の点火を促進することはわかった．RF/C が放出した電子が H/C のインサートの加熱に影響を与えているかどうかを調査するために点火手順を変更して実験を行った．インサートの温度を測定するのは難しい．インサートに特殊な加工を施す必要がある．また，本研究における実験ではプラズマが存在するため熱電対による測定は困難である．よって，図 4.11 の手順に従い RF/C を点火させるタイミングを遅らせ，H/C へどのような影響を与えるかを評価する．図 4.10 の実験手順と図 4.11 の実験手順でどのような違いがあるかを調査した．また，図 4.10 の実験手順を手順①，図 4.11 の実験手順を手順②とする．

点火手順変更実験の結果を図 5.13 に示す．H/C+RF/C_③において，手順②では手順①よりもヒーター電力が大きかったが点火時間に差はなかった．手順②では，インサートが放電可能温度まで達するのに手順①よりも大きなヒーター電力を必要としたと思われる．手順①においては，RF/C を先に点火していたため RF/C が放出した電子によりインサートが加熱されていたと考えられる．しかし手順②においては，RF/C を点火させるタイミングが遅いので RF/C が放出する電子がインサートの加熱に影響を与えていないと考えられる．よって，手順②ではヒーター電力が手順①よりも大きかったと思われる．また，H/C+RF/C_②においては，どちらの手順においても RF/C が放出した電子がキーパーに流れず H/C に影響を与えていないため，実験結果に差はなかったと思われる．

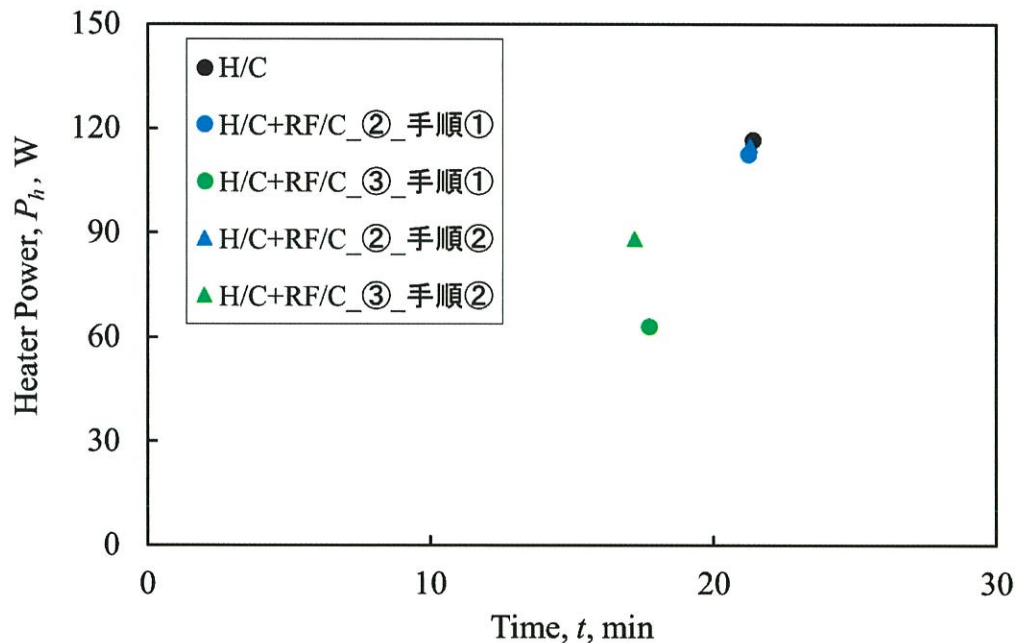


図 5.13 点火手順変更実験結果

5.5 ホールスラスタとの組み合わせ作動

5.5.1 実験結果

H/C+RF/Cにおいて、スラスタとの組み合わせ作動の実証を行うためにホールスラスタとの組み合わせ作動を行った。H/C+RF/C_③においてH/C点火後、RF/Cの作動を停止させた後にホールスラスタに磁場を形成し推進剤を流してアノードに電圧を印加させた。H/Cは、ホールスラスタの推力軸に対して90度傾いた位置に設置している。RF/Cは、H/Cに対して45°傾いているため、ホールスラスタとH/Cの間に位置するように配置した。

図5.14はホールスラスタが作動した時の様子である。放電電圧350V、アウターコイル電流0.6A、インナーコイル電流0.15A、推進剤流量20sccmにおいて作動を確認した。また、H/Cの流量は3sccmである。電子電流が不足することなく正常にホールスラスタを作動させることができたため、RF/Cが放出した電子を利用して点火させたH/Cをスラスタと組み合わせることができるといえる。

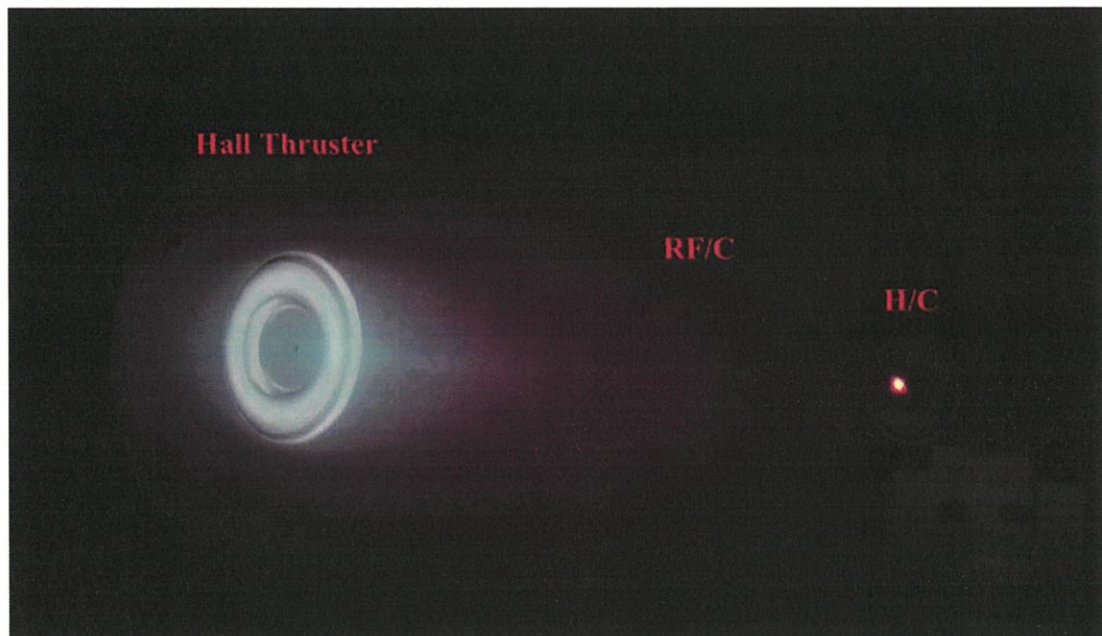


図 5.14 ホールスラスタ点火時の様子

第 6 章 結論

6.1 結論

本研究では H/C と RF/C を組み合わせて作動させることで RF/C が放出した電子が H/C システムに与える影響を評価した。カソードの配置や作動条件を変更して実験を行い、H/C の点火時間およびヒーター電力を評価項目とした。その結果、以下の結論が得られた。

1. H/C と RF/C を組み合わせることで、H/C と RF/C を対面に配置した H/C+RF/C_①と H/C と RF/C を平行に配置し H/C の軸を 45° 傾けた H/C+RF/C_③において、H/C のみで点火させた場合と比較して H/C の点火にかかる時間が短縮されヒーター電力が減少した。RF/C が放出した電子によってキーパーに電流が流れたことから、RF/C が放出した電子によって H/C の点火を促進することができヒーターによる制限が緩和された。H/C と RF/C を平行に配置した H/C+RF/C_②では点火時間の短縮およびヒーター電力の減少は確認されなかった。
2. H/C と Inner Coil RF/C を組み合わせることで H/C 点火前に H/C 側に容量結合プラズマが生成されたのを確認した。容量結合プラズマにより H/C 内部のプラズマが生成しやすくなり H/C の点火が促進されたと考えられる。
3. キーパー電圧 $V_k = 50 \text{ V}$ を $V_k = 70 \text{ V}$ に変更することで、H/C+RF/C_②および H/C+RF/C_③においてより多くの電子がキーパーに流れ込んだ。それにより H/C+RF/C_②では点火時間が短縮されヒーター電力が減少した。H/C+RF/C_③では点火時間は短縮されたがヒーター電力は変わらなかった。
4. 高周波電力 $P_{RF} = 100 \text{ W}$ を $P_{RF} = 50 \text{ W}$ に変更しても H/C+RF/C_③において点火時間が短縮されヒーター電力が減少した。これにより H/C+RF/C_③においてシステム全体としての消費電力を H/C のみの場合と同程度に保ちつつ、点火時間を短縮しヒーター電力を減少させることができた。
5. 点火手順を変更することで、H/C+RF/C_③では RF/C が点火している時間が長いほど小さいヒーター電力で点火した。よって、RF/C が放出した電子が H/C におけるインサートの加熱に影響を与えていることがわかった。
6. ホールスラスタとの組み合わせ作動において、RF/C が放出した電子を利用して点火させた H/C でホールスラスタを作動させることに成功した。よって、H/C+RF/C のシステムをスラスタと組み合わせることが可能である。

参考文献

- 1) 栗木恭一, 荒川義博 : 電気推進ロケット入門, 東京大学出版会, pp. 20-21, pp. 141-155, 2003.
- 2) Casaregola, C. : Electric Propulsion for Station Keeping and Electric Orbit Raising on Eutelsat Platforms, Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science, 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nano-satellite Symposium, IEPC-2015-97/ ISTS-2015-b-97, 2015.
- 3) 鳩岡恭志, 佐野伊彦, 工藤伸夫, 久本泰慶, 深津敦 : 技術試験衛星 9 号機によるオール電化衛星の開発, 日本航空宇宙学会誌, 第 65 巻, 第 10 号, pp. 15-19, 2017.
- 4) 鳥井健笑, 大塩裕哉, 窪田健一, 船木一幸, 奥野 喜裕 : ホローカソードにおける放電モードおよびプラズマ特性の実験的研究, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2018-4119, 2018.
- 5) 横田茂, 片岡久志, 鶴生知輝, 佐宗章弘, 小島康平, 木村竜也 : 大電流ホローカソードの開発, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, 2014.
- 6) Dan M. Goebel, Ira Katz : Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, JPL Space Science and Technology Series, pp. 243-248, pp. 325-328, 2008.
- 7) Hiroki Watanabe et al, Performance Evaluation of TAL-type Hall Thruster with RF Plasma Cathode, 34th International Electric Propulsion Conference, IEPC2015-217, 2015.
- 8) 青山周平 : RF カソード/TAL 型ホールスラスタ組み合わせ時の性能評価, 平成 30 年度首都大学東京大学院修士論文, pp. 9, 2019
- 9) E. Y. Choueiri : Fundamental difference between the two Hall Thruster Variants, Phys. Plasmas, 8, 11, 2001.
- 10) 太田知里 : アノードレイヤー型ホールスラスタおよびその推力測定機構に関する研究, 平成 26 年度首都大学東京大学院修士論文, pp. 7, 2015
- 11) 鈴木茂夫 : わかりやすい高周波技術入門, 日刊工業新聞社, pp. 95-101, 2010
- 12) 松山淳子 : イオンエンジン用ホローカソードの放電モードとプラズマ特性評価, 平成 16 年度東京都立科学技術大学大学院修士論文, pp. 38, 2005
- 13) 鳥井夏実 : RF カソードの大電流作動特性とホールスラスタへの適用研究, 平成 25 年度首都大学東京大学院修士論文, pp. 47-51, 2014

謝辞

竹ヶ原研究室に配属されて3年が経ちます。この3年間で多くの事を学び修士論文として研究成果をまとめることができたのは、今まで支えてくださった方々のおかげだと思います。この3年間でお世話になった方々へ心より感謝を申し上げます。

竹ヶ原先生には厳しくありながら親身になってご指導をしていただきました。基本的な知識は勿論のこと、研究の進め方や研究に対する姿勢まで教えていただきました。3年間で教えていただいたことは今後の人生において必ず活けると信じています。本年度で竹ヶ原研究室は最後ということもあり、お忙しい中最後までご指導をしていただき本当にありがとうございました。そして今まで本当にお疲れ様でした。

共同研究においては、株式会社高橋電機製作所の高橋徹 様、三菱電機株式会社の大須賀弘行様には多大なるご支援をいただき心より御礼申し上げます。

助教の渡邊先生には的確なアドバイスをいただき多くの場面で助けていただきました。本当に知識が豊富で、突拍子に質問をしても詳しく答えて下さり本当にありがとうございました。

宇宙科学研究所名誉教授である栗木恭一先生には研究室のゼミでお世話になりました。多くの知識や経験からいただく助言はとても貴重なものでした。

昨年ご卒業されたIONチームの先輩である青山さん、杉山さんには電気推進の基本的な知識から実験装置の使い方まで多くの事を教えていただきました。青山さんはいつも気にかけて下さり、資料を見ていただいたり研究のアドバイスをしていただいたりして本当に助けていただきました。杉山さんは実験装置の使い方を教えていただいたり就職活動の相談にも乗ってくださったりしてお世話になりました。お二人がいたおかげで3年間研究を続けることができました。本当にありがとうございました。

IONチームの後輩の長峯君には実験準備の手伝いなどをしてもらい感謝しています。あまり実験を手伝ってあげられなくて申し訳なかったです。何かあればいつでも相談に乗るので大変だとは思いますがこれからも研究を頑張ってください。

最後に、博士前期課程修了まで支えてくださった家族へ心より感謝を申し上げます。

2020年1月24日 野末直暉